

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公表特許公報(A)

(11) 特許出願公表番号

特表2004-527117

(P2004-527117A)

(43) 公表日 平成16年9月2日(2004.9.2)

(51) Int.Cl.<sup>7</sup>

H01L 21/3065

F1

H01L 21/302 103

テーマコード(参考)

5F004

審査請求有 予備審査請求有 (全 54 頁)

(21) 出願番号 特願2002-575595 (P2002-575595)  
 (86) (22) 出願日 平成14年3月25日 (2002.3.25)  
 (85) 翻訳文提出日 平成15年9月24日 (2003.9.24)  
 (86) 国際出願番号 PCT/US2002/009073  
 (87) 国際公開番号 W02002/077589  
 (87) 国際公開日 平成14年10月3日 (2002.10.3)  
 (31) 優先権主張番号 60/277,981  
 (32) 優先日 平成13年3月23日 (2001.3.23)  
 (33) 優先権主張国 米国 (US)

(71) 出願人 000219967  
 東京エレクトロン株式会社  
 東京都港区赤坂五丁目3番6号  
 (74) 代理人 100058479  
 弁理士 鈴江 武彦  
 (74) 代理人 100091351  
 弁理士 河野 哲  
 (74) 代理人 100088683  
 弁理士 中村 誠  
 (74) 代理人 100084618  
 弁理士 村松 貞男  
 (74) 代理人 100092196  
 弁理士 橋本 良郎

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 部分最小自乗を使用したエンドポイント検知方法と装置

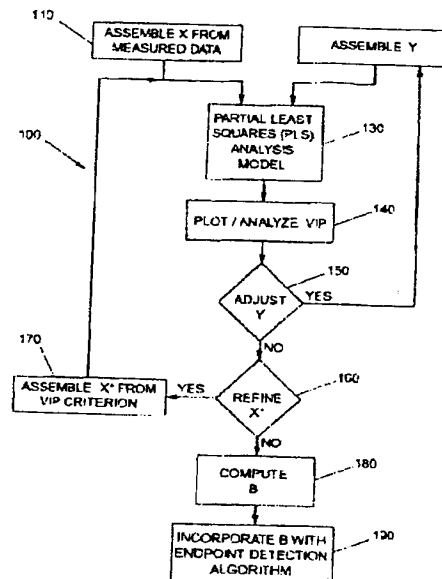
(57) 【要約】

【課題】

エッチングリアクタ内のフィーチャーエッチング完了を検知する装置と方法。

【解決手段】

第1の記録されたデータマトリクス(110)を形成するために第1のエッチングプロセスに関する最初に測定されたデータを記録し、エッチングプロセス用に目標エンドポイントデータを使用して第1のエンドポイント信号マトリクスをアセンブルし、第1の記録されたデータマトリクスをリファインするために第1の記録されたデータマトリクスと第1のエンドポイント信号マトリクス上の部分最小自乗(130)を達成し、リファインされ記録されたデータマトリクスと第1のエンドポイント信号マトリクスに基づいて相関関係マトリクス(180)を算出する。第2の記録されたデータマトリクスを形成するための第2のエッチングプロセスを達成する。相関関係マトリクスと第2の記録されたデータマトリクスは第2のエッチングプロセスのエンドポイントの達成の決定用に解析される。



**【特許請求の範囲】****【請求項 1】**

フィーチャーエッチング完了を検知する方法であって、この方法は：  
相関関係マトリクスを決定するステップを備え、このステップは；  
第 1 の記録されたデータマトリクスを形成するために連続した時間間隔に  
わたって第 1 のエッチングプロセスに関する最初に測定されたデータを記録  
し、

特定のエッチングプロセス用に目標エンドポイントデータを使用して第 1  
のエンドポイント信号マトリクスをアセンブルし、  
第 1 の記録されたデータマトリクスをリファインするために第 1 の記録さ  
れたデータマトリクスと第 1 のエンドポイント信号マトリクス上の部分最小  
自乗解析を達成し、また  
リファインされ記録されたデータマトリクスと第 1 のエンドポイント信号  
マトリクスに基づいて相関関係マトリクスを算出すること、  
によって行なわれ；また

第 2 の記録されたデータマトリクスを形成するための第 2 のエッチングプロセスを達成す  
るステップを備えていて、相関関係マトリクスと第 2 の記録されたデータマトリクスは、  
第 2 のエッチングプロセスのエンドポイントが達成されたかどうかを決定するために解析  
される方法。

**【請求項 2】**

前記部分最小自乗解析を達成するステップは；

第 1 の測定されたデータの第 1 のエンドポイント信号マトリクスに影響するように規定さ  
れたプロジェクションデータの変数重要度を計算するステップと；  
プロジェクションデータの変数重要度の解析に基づいて第 1 の記録されたデータマトリク  
スをリファインするステップと；  
を備えている請求項 1 記載の方法。

**【請求項 3】**

第 1 の記録されたデータマトリクスをリファインするステップは、第 1 の記録されたデー  
タマトリクス内の変数が第 1 のエンドポイント信号マトリクス上の最小インパクトを有す  
るように除去できるかどうかを決定するためにプロジェクションデータの変数重要度を解  
析することを備えている請求項 2 記載の方法。

**【請求項 4】**

予め定められたしきい値以下のプロジェクションデータ値の変数重要度を有している変数  
は捨てられる請求項 3 記載の方法。

**【請求項 5】**

予め定められた範囲内のプロジェクションデータ値の変数重要度を有している変数は捨て  
られる請求項 3 記載の方法。

**【請求項 6】**

変数の数に関連するプロジェクションデータ値の変数重要度の少なくとも一次導関数は、  
それ以下では変数が捨てられるプロジェクションデータの変数重要度用に、しきい値を選  
択するために使用される請求項 3 記載の方法。

**【請求項 7】**

第 2 のエッチングプロセスを達成するステップは；

処理チャンバー内で第 2 のエッチングプロセスを開始するステップと；

少なくとも 1 つの記録されたデータベクトルの第 2 の記録されたデータマトリクスを形成  
するために、連続的な時間間隔にわたって第 2 のエッチングプロセスに関する第 2 の測定  
されたデータを記録するステップと；

少なくとも 1 つの記録されたデータベクトルと相関関係のマトリクスの少なくとも 1 つの  
重みベクトルとを乗算することによって、少なくとも 1 つのエンドポイント信号を計算す  
るステップと；

10

20

30

40

少なくとも1つのエンドポイント信号を検査することによって、エンドポイントが達成されたかどうかを決定するステップと；  
 エンドポイントが達成された場合にエッチングプロセスを停止するステップと；  
 を備えた請求項1記載の方法。

【請求項8】

第1のエッチングプロセスと第2のエッチングプロセスとは、単一の処理チャンバー内で達成される請求項1記載の方法。

【請求項9】

相関関係マトリクスは、選択された処理チャンバー内で達成されたエッチングプロセス用に計算される請求項1記載の方法。

【請求項10】

目標データは、選択された処理チャンバー内の実験によって決定され、選択された処理チャンバーは第2のエッチングプロセス用に使用される請求項1記載の方法。

【請求項11】

測定されたデータは、光放射データである請求項1記載の方法。

【請求項12】

測定されたデータは、電気的信号データである請求項1記載の方法。

【請求項13】

測定されたデータは、整合ネットワークキャパシタ設定データである請求項1記載の方法。

【請求項14】

第1の記録されたデータマトリクス、第1のエンドポイント信号マトリクス、および相関関係マトリクスは、

【数1】

$$\overline{XB} = \overline{Y},$$

の関係によって規定され：

ここにおいて、[X]はm掛けるnのデータポイントを有する第1の記録されたデータマトリクスを示していて、[B]はn掛けるpのデータポイントを有する相関関係マトリクスを示していて、[Y]はm掛けるpのデータポイントを有する第1のエンドポイント信号マトリクスを示している請求項1記載の方法。

【請求項15】

第1の記録されたデータマトリクスと第2の記録されたデータマトリクス内の所定の即時インタイムのデータは、各マトリクスの列の要素の平均値を算定し、その平均値を各要素から引くことによって、平均中心合わせされている請求項1記載の方法。

【請求項16】

第1の記録されたデータマトリクスおよび第2の記録されたデータマトリクス内の所定の即時インタイムのデータは、各マトリクスの列のデータの標準的偏倚を決定することによって標準化されている請求項1記載の方法。

【請求項17】

エッチングプロセスを達成するために構成されたエッチングリアクタを備えていて、前記エッチングプロセスは前記エッチングリアクタに接続された出力源によって駆動され；  
 前記エッチングプロセスのエンドポイントを検知するためのエンドポイント検知装置を備えていて、前記エンドポイント検知装置は、検知セクションと計算セクションとを備え、前記検知セクションは前記エッチングリアクタ内のエッチングプロセスに関連するデータマトリクスを形成するために、連続した時間間隔にわたって第1のエッチングプロセスに関する第1の測定されたデータを使用して、相関関係マトリクスを決定し、特定のエッチングプロセス用の目標エンドポイントデータを使用して第1のエンドポイント信号マ

トリクスをアセンブルし、第1の記録されたデータマトリクスをリファインするために第1の記録されたデータマトリクス上と第1のエンドポイント信号マトリクスの部分最小自乗を達成し、リファインされ記録されたデータマトリクスと第1のエンドポイント信号マトリクスに基づいて相関関係マトリクスを算出し、そして、第2のエッチングプロセス用に第2の記録されたデータマトリクスを形成するために構成されていて、前記計算セクションは、相関関係マトリクスと第2の記録されたデータマトリクスを解析し、第2のエッチングプロセスのエンドポイントが達成された場合にエンドポイント信号を生成するように構成されていて；

前記計算セクションから前記エンドポイント信号を受けるために構成された制御装置を備えていて、前記制御装置は前記エンドポイント信号に基づいて前記出力源を制御するために構成されている装置。 10

【請求項18】

前記検知セクションは、前記エッチングリアクタ内の放射スペクトルを連続的に検知するために構成されたフォトディテクタを備えている請求項17記載の装置。

【請求項19】

フォトディテクタセクションは、高解像度光放射分光センサーを備えている請求項18記載の装置。

【請求項20】

エッチングリアクタは、そこを通して前記検知セクションが放射スペクトルを検知する透明の材料で作られたのぞき窓を有する真空チャンバーを備えている請求項18記載の装置。 20

【請求項21】

前記エッチングリアクタは、真空チャンバーと、前記真空チャンバー内に設けられた一対の平行な板状電極と、前記真空チャンバーに接続されたガス注入ラインと、および、前記真空チャンバーに接続されたガス排出ラインとを備えた容量結合プラズマリアクタである請求項17記載の装置。

【請求項22】

前記エッチングリアクタは、複数周波数の容量結合プラズマリアクタと、誘電結合プラズマリアクタと、電子サイクロトロン共鳴リアクタと、ヘリコンプラズマリアクタとから本質的になるグループから選択される請求項17記載の装置。 30

【請求項23】

前記計算セクションは、第1の測定されたデータの第1のエンドポイント信号マトリクス上の誘電として規定されたプロジェクションデータの変数重要度を計算し、プロジェクションデータの変数重要度の解析に基づいて第1の記録されたデータマトリクスをリファインするために構成されている請求項17記載の装置。

【請求項24】

前記計算セクションは、第1の記録されたデータマトリクス内の変数が第1のエンドポイント信号マトリクス上の最小インパクトを有するように除去できるかどうかを決定するためにプロジェクションデータの変数重要度を解析し、第1の記録されたデータマトリクスをリファインするために構成されている請求項23記載の装置。 40

【請求項25】

前記検知セクションは、前記エッチングリアクタ内のエッチングプロセスに関連する電気的信号データを連続的に検知するために構成されている請求項17記載の装置。

【請求項26】

前記検知セクションは、前記エッチングリアクタ内のエッチングプロセスに関連する整合ネットワークキャパシタ設定データを連続的に検知するために構成されている請求項17記載の装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

## 発明の背景

本発明は、一般に半導体製造中におけるエンドポイント検知(endpoint detection)に関する。

### 【背景技術】

#### 【0002】

### 関連出願との相互参照

この出願は、2001年3月23日に出願された米国特許出願第60/277,981号の優先権を主張する。

#### 【0003】

### 発明の分野

発明者等は、従来のプロセスリアクタおよびそれらのリアクタを使用する方法が有する問題を本発明によって解決されたことを確認した。

#### 【0004】

### 背景の論議

代表的には、半導体プロセス中に、ファインライン(fine line)に沿ってまたはシリコン基板条にパターン化されたビア(via)またはコンタクト(contact)内で、材料を除去またはエッチングするために、(ドライ)プラズマエッチングプロセスが利用される。このプラズマエッチングプロセスは、一般に、重ね合わせパターン、例えばフォトリソ層のような保護層を有する半導体基板をプロセスチャンバー内に配置することを含んでいる。基板がチャンバー内に一旦配置されると、イオン化可能な解離ガス混合物が、予め特定された流れ率でチャンバー内に導入されるのに対して、真空ポンプが周囲のプロセス圧力を達成するために絞られる。その後、プラズマは、存在するガス種(species)の少量が、誘電的か静電容量的かのいずれかの高周波(RF)出力、あるいは、例えば電子サイクロトロン共鳴(electron cyclotron resonance)(ECR)を使用したマイクロ波出力の搬送を介して加熱された電子によってイオン化された場合に形成される。さらに、加熱された電子は、周囲のガス種のいくつかの種を解離するのに役立ち、露出された表面エッチング化学反応に適した反応種を生成する。プラズマが一旦形成されると、基板の露出された表面がプラズマによってエッチングされる。プロセスは、所定の反応物の適切な集中と、基板の露出された領域における種々の態様(例えば、トレンチ、ビア(vias)、コンタクト等)をエッチングするイオン集団(population)を含む最適な条件を達成するために調整される。エッチングが要求されるそのような基板材料は、二酸化シリコン( $\text{SiO}_2$ )ポリシリコン、および窒化シリコンを含む。

#### 【0005】

フィーチャーサイズ(feature size)が収縮し、集積回路(IC)組立中に使用されるエッチングプロセスステップの数と複雑さとがエスカレートすると、タイトなプロセス制御用の要求がより厳しいものとなる。従って、そのようなプロセスのリアルタイムの監視と制御が、半導体ICの製造において飛躍的に重要となってきた。例えば、エッチングステップまたはプロセスのタイムリーな完成用に必要なある監視および制御診断は、エンドポイント検知である。

#### 【0006】

エンドポイント検知は、エッチングステップの制御のために、また特に、フィーチャーエッチング(feature etch)完成またはエッチング先端部がエッチング停止層に到達した場合に正確な即時インタイム(instant in time)検知のために参照される。エッチングプロセスエンドポイントが不適切に検知された場合、次に、フィーチャーの厳密なアンダーカットがエッチング過剰のために生じ、または、部分的に完全なフィーチャーがアンダーエッチングによりもたらされる。その結果、不十分なエンドポイント検知が、失敗のリスクを増加するような不十分な品質の装置に導く。それゆえ、エッチングプロセスの正確で精密な完成は製造プロセス中に関係するための重要な領域である。

#### 【0007】

エンドポイント検知に使用されるあるアプローチは、発光分光法(optical emission spec

10

20

30

40

50

troscopy) (OES) を使用して、インタイム(in time)に予め特定された波長で、光の放射強度(emission intensity)を監視することである。そのような方法は、エッチングプロセスエンドポイントで明白な変移(transition)を示すエッチングプロセスに存在する化学種に対応する波長を確認しなければならなかった。次に、結果信号は、放射強度の明白な変移を検知するために分析され、結果信号の分析はエッチングプロセスの完成に相互に関連して使用される。代表的には、種は、反応種または揮発性エッチングプロセスに対応して選択された。例えば、選択された波長は、 $\text{SiO}_2$  とポリマーフィルムのエッチングの場合に  $\text{CO}^*$  放射に対応し、窒化物フィルムのエッチングの場合に  $\text{N}^*$  または  $\text{CN}^*$  放射に対応し、ポリシリコンのエッチングの場合に  $\text{SiF}^*$  に対応し、アルミニウムのエッチングの場合に  $\text{AlCl}^*$  放射に対応する。

10

#### 【0008】

上述した単一波長での放射強度を監視するアプローチに加えて、他のアプローチは、2つの波長での光の強度を監視し、2つの強度の比率（または、それらの数学上の操作）を記録することである。例えば、一方の波長は、エンドポイントでその集中が減衰する種用を選択され、第2の波長は、エンドポイントでその集中が増加する種用を選択される。それゆえ、比率は信号対雑音比を改良する。

#### 【0009】

しかしながら、ICデバイスサイズが縮小するにつれて、また、露出開口領域(exposed open area)が対応して減少すると、単一および2重波長エンドポイント検知スキームは、プロセスからの低い信号雑音比 ( $S/N$ ) を抽出するためにそれらの減少された強固さ故に、使用が限定されることが見出された。次に、プロセス技術者は、製造環境における十分な強固さを有する正しい波長を選択する恐るべき挑戦を示してきて、その結果、より技巧的なエンドポイント検知スキームが現れてきた。技巧的なエンドポイント検知が、数百の波長でのサンプルデータに計画され（すなわち、広い放射スペクトルが、エッチングプロセス中に適切な時間の各即時インタイムに記録される。）、また、主成分解析(Principal Component Analysis) (PCA) のような多変数のデータ分析技法が、エンドポイント信号を抽出するための適用された。

20

#### 【0010】

PCAにおいて、固有値解析(eigenvalue analysis)、特異値分解(singular value decomposition) (SVD)、および非線形部分最小自乗(nonlinear partial least-square) (NIPALS) を含むいくつかの技法が、データ散乱の変化が最大な多次元空間における主成分(principle)方向を確認するために採用されてきた。多次元空間の次元は、記録された、すなわち放射強度の個別の波長の数が記録された変数の数と等しい。またそれゆえ、PCAは、放射強度の変化が最大である多次元空間の方向を確認する。換言すれば、主成分構成要素は、各変数用の重み(weighting)係数のシリーズとして作用する。代表的には、第1の3つまたは4つの主成分構成要素(3つまたは4つの最大固有値に対応する)は、新たに記録されたデータから3つまたは4つのエンドポイント信号を引き出すために選択され採用される。しかしながら、光放射データの多変数解析用にPCAを使用することの欠点は、数学的厳密さおよび解析が伴うような複雑さを含んでいて、また、より重要なことに、エンドポイント信号を含む減少されたデータのセットを抽出するためのエッチングプロセスを有する物理的基準の使用に欠けている。

30

40

#### 【発明の開示】

#### 【発明が解決しようとする課題】

#### 【0011】

従って、何が必要であるかという、上記で確認された欠点を克服するエンドポイント検知用の改良された装置と方法である。

#### 【課題を解決するための手段】

#### 【0012】

#### 発明の概要

従って、本発明は、フィーチャーエッチング完成の改良された検知用の装置と方法を有利

50

に提供することである。

本発明の実施例は、有利には、第1の記録されたデータマトリクスを形成するために連続した時間間隔にわたって第1のエッチングプロセスに関する最初に測定されたデータを記録し、特定のエッチングプロセス用に目標エンドポイントデータを使用して第1のエンドポイント信号マトリクスをアSEMBルし、第1の記録されたデータマトリクスをリファインするために第1の記録されたデータマトリクスと第1のエンドポイント信号マトリクス上の部分最小自乗解析を達成し、またリファインされ記録されたデータマトリクスと第1のエンドポイント信号マトリクスに基づいて相関関係マトリクスを算出することによって、相関関係マトリクスを決定するステップを備えた方法を提供する。この方法はさらに、第2の記録されたデータマトリクスを形成するための第2のエッチングプロセスを達成するステップを備えていて、相関関係マトリクスと第2の記録されたデータマトリクスは、第2のエッチングプロセスのエンドポイントが達成されたかどうかを決定するために解析される。

#### 【0013】

本発明の方法の好ましい実施例は、部分最小自乗解析を達成するステップが、第1の測定されたデータの第1のエンドポイント信号マトリクスに影響するように規定されたプロジェクションデータの変数重要度を計算するステップと、プロジェクションデータの変数重要度の解析に基づいて第1の記録されたデータマトリクスをリファインするステップとを備えているように規定されている。第1の記録されたデータマトリクスをリファインするステップは、第1の記録されたデータマトリクス内の変数が第1のエンドポイント信号マトリクス上の最小インパクトを有するように除去できるかどうかを決定するためにプロジェクションデータの変数重要度を解析することを備えている。リファイン中に使用され捨てられる変数は、予め定められたしきい値以下のプロジェクションデータ値の変数重要度を有しているか、または、予め定められた範囲内にある。これに替えて、可変数に関連するプロジェクションデータ値の変数重要度の少なくとも一次導関数は、それ以下では変数が捨てられるプロジェクションデータの変数重要度用に、しきい値を選択するために使用される。

#### 【0014】

この方法の好ましい実施例は、第2のエッチングプロセスを達成するステップが、処理チャンバー内で第2のエッチングプロセスを開始するステップと、少なくとも1つの記録されたデータベクトルの第2の記録されたデータマトリクスを形成するために、連続的な時間間隔にわたって第2のエッチングプロセスに関する第2の測定されたデータを記録するステップと、少なくとも1つの記録されたデータベクトルと相関関係のマトリクスの少なくとも1つの重みベクトルとを乗算することによって、少なくとも1つのエンドポイント信号を計算するステップと、少なくとも1つのエンドポイント信号を検査することによって、エンドポイントが達成されたかどうかを決定するステップとエンドポイントが達成された場合にエッチングプロセスを停止するステップとを備えているように規定される。

#### 【0015】

好ましい実施例において、第1のエッチングプロセスと第2のエッチングプロセスとは、単一の処理チャンバー内で達成される。相関関係マトリクスは、選択された処理チャンバー内で達成されたエッチングプロセス用に計算される。目標データは、選択された処理チャンバー内の実験によって決定され、選択された処理チャンバーは第2のエッチングプロセス用に使用される。

#### 【0016】

好ましい実施例において、測定されたデータは、光放射データであるが、しかしながらこれに替えて、測定されたデータは、電気的信号データであるか、および／または、測定されたデータは、整合ネットワークキャパシタ設定データである。

#### 【0017】

好ましい実施例において、第1の記録されたデータマトリクス、第1のエンドポイント信号マトリクス、および相関関係マトリクスは、

【数 1】

$$\overline{XB} = \overline{Y},$$

【0018】

の関係によって規定され：

ここにおいて、[X] は m 掛ける n のデータポイントを有する第 1 の記録されたデータマトリクスを示していて、[B] は n 掛ける p のデータポイントを有する相関関係マトリクスを示していて、[Y] は m 掛ける p のデータポイントを有する第 1 のエンドポイント信号マトリクスを示している。第 1 の記録されたデータマトリクスと第 2 の記録されたデータマトリクス内の所定の即時インタイムのデータは、各マトリクスの列の要素の平均値を算定し、その平均値を各要素から引くことによって、平均中心合わせされているか、または、第 1 の記録されたデータマトリクスおよび第 2 の記録されたデータマトリクス内の所定の即時インタイムのデータは、各マトリクスの列のデータの標準的偏倚を決定することによって標準化されている。

【定義】

【0019】

本明細書において、[X] は  $\overline{X}$  を意味し、[B] は  $\overline{B}$  を意味し、[Y] は  $\overline{Y}$  を意味し、[y<sub>1</sub>] は  $\overline{y_1}$  を意味し、[y<sub>2</sub>] は  $\overline{y_2}$  を意味し、[T] は  $\overline{T}$  を意味し、[P] は  $\overline{P}$  を意味し、[U] は  $\overline{U}$  を意味し、[C] は  $\overline{C}$  を意味し、[E] は  $\overline{E}$  を意味し、[F] は  $\overline{F}$  を意味し、[H] は  $\overline{H}$  を意味し、[W] は  $\overline{W}$  を意味することをここで定義する。

本発明の実施例は有利には、エッチングプロセスを達成するために構成されたエッチングリアクタを備えていて、エッチングプロセスはエッチングリアクタに接続された出力源によって駆動され、エッチングプロセスのエンドポイントを検知するためのエンドポイント検知装置を備えていて、エンドポイント検知装置は、検知セクションと計算セクションとを備え、検知セクションはエッチングリアクタ内のエッチングプロセスに関連するデータを連続的に検知するために構成されていて、計算セクションは、第 1 の記録されたデータマトリクスを形成するために、連続した時間間隔にわたって第 1 のエッチングプロセスに関する第 1 の測定されたデータを使用して、相関関係マトリクスを決定し、特定のエッチングプロセス用の目標エンドポイントデータを使用して第 1 のエンドポイント信号マトリクスをアセンブルし、第 1 の記録されたデータマトリクスをリファインするために第 1 の記録されたデータマトリクス上と第 1 のエンドポイント信号マトリクスの部分最小自乗を達成し、リファインされ記録されたデータマトリクスと第 1 のエンドポイント信号マトリクスに基づいて相関関係マトリクスを算出し、そして、第 2 のエッチングプロセス用に第 2 の記録されたデータマトリクスを形成するために構成されていて、計算セクションは、相関関係マトリクスと第 2 の記録されたデータマトリクスを解析し、第 2 のエッチングプロセスのエンドポイントが達成された場合にエンドポイント信号を生成するように構成されていて、計算セクションからエンドポイント信号を受けるために構成された制御装置を備えていて、制御装置はエンドポイント信号に基づいて出力源を制御するために構成されている装置を提供する。

【0020】

本発明の装置の好ましい実施例は、検知セクションが、エッチングリアクタ内の放射スペクトルを連続的に検知するために構成されたフォトディテクタを備えるように構成されている。フォトディテクタセクションは、高解像度光放射分光センサーを備えている。エッチングリアクタは、そこを通して検知セクションが放射スペクトルを検知する透明の材料



で作られたのぞき窓を有する真空チャンバーを好ましくは備えている。

【0021】

好ましいエッチングリアクタは、真空チャンバーと、真空チャンバー内に設けられた一対の平行な板状電極と、真空チャンバーに接続されたガス注入ラインと、および、真空チャンバーに接続されたガス排出ラインとを備えた容量結合プラズマリアクタである。これに替えて、エッチングリアクタは、複数周波数の容量結合プラズマリアクタと、誘電結合プラズマリアクタと、電子サイクロトロン共鳴リアクタと、ヘリコンプラズマリアクタとから本質的になるグループから選択される。

【0022】

好ましい実施例において、計算セクションは、第1の測定されたデータの第1のエンドポイント信号マトリクス上の誘電として規定されたプロジェクションデータの変数重要度を計算し、プロジェクションデータの変数重要度の解析に基づいて第1の記録されたデータマトリクスをリファインするために構成されている。計算セクションは、第1の記録されたデータマトリクス内の変数が第1のエンドポイント信号マトリクス上の最小インパクトを有するように除去できるかどうかを決定するためにプロジェクションデータの変数重要度を解析し、第1の記録されたデータマトリクスをリファインするために好ましくは構成されている。

【0023】

これに替わる実施例において、検知セクションは、エッチングリアクタ内のエッチングプロセスに関連する電気的信号データを連続的に検知するためか、および/または、エッチングリアクタ内のエッチングプロセスに関連する整合ネットワークキャパシタ設定データを連続的に検知するために構成されている。

【0024】

本発明のより完全な理解とそれに付随する利点は、特に添付した図面と関連して考慮した場合に、以下の詳細な記述と関連して容易に明らかになるであろう。

【発明を実施するための最良の形態】

【0025】

好ましい実施例の記述

上述したように、発明者等は、従来のプロセスリアクタおよびそれらのリアクタを使用する方法が有する問題を本発明によって解決されることを確認した。従って本発明は、従来のプロセスリアクタに関して確認された欠点を克服するエンドポイント検知用の改良された装置と方法とを提供する。

【0026】

発明者等は、小さい開口領域(open area)基板のエッチングプロセス用にエンドポイントを正確に検知することが困難であることを認識した。デバイスが縮小すると開口領域も収縮し、従ってエンドポイント信号と信号対雑音比も減少する。何が必要であるかという、エッチングプロセスによって公知の物理的基準を使用してエンドポイント信号を抽出するための多変数解析アプローチを簡単にするのである。

【0027】

さらに、発明者等は、ウェーハからウェーハにエッチングプロセス用のエンドポイントを反復的に検知することは困難であることを認識した。エンドポイント検知アルゴリズムは、プロセス条件においてウェーハからウェーハの変化可能性を克服するために強固でなければならない。何が必要であるかという、ウェーハからウェーハに操作者の干渉がない最小の要求をする強固なアルゴリズムである。

【0028】

発明者等は、最も有益なエンドポイント信号を含む波長を選択することが重要であることを認識した。上述したように、エンドポイント信号を抽出するために採用された従来の多変数解析技法は、数学的に複雑で厳しく、また、信号を抽出するためのプロセスに関する情報を備えていない。PCAにおいて、ごく僅かの主成分構成要素が、データからエンドポイント信号抽出のために選択された。しかしながら、これらの構成要素を選択するため

に使用された基準は、その場限りのものである。従って、重要な波長を選択し、エッチングプロセス物理学に基づいて告知された決定を使用するウエートを指定する方法が必要である。放射スペクトルから波長の選択と除去に関する告知された決定を作り出すために物理的基準のセットが必要である。

#### 【0029】

本発明を、発明者らによって確認され上述された問題を克服する有利な構造と方法を提供する好ましい実施例を参照して説明する。

図面を参照すると、図1は、プラズマエッチングリアクタすなわちデバイスBと、エッチングプロセスのエンドポイントを検知するためにプラズマエッチングデバイスBによって処理されるエンドポイント検知装置A'を表わしている。プラズマエッチングデバイスBは好ましくは、アルミニウムのような導電性の材料で形成された真空処理チャンバー1と、真空チャンバー1の上部と下部に設けられた1対の平行な電極2と3を備えている。電極2と3は、電極2と3が予め定められた間隙を有するように真空チャンバー1内に設けられている。ガス供給ライン4とガス排出ライン5とは、真空処理チャンバー1に接続されている。ガス供給ライン4は、過フッ化炭化水素(fluorocarbon) (例えば、CF<sub>4</sub>のようなCFシリーズ) エッチングガスをエッチングガス供給セクション20から真空チャンバー1内へ導入するために用いられている。ガス排出ライン5は、使用されていないプロセスガスと真空チャンバー1内で生じた反応排出物を、真空ポンプを通して真空チャンバー1の外部の排出物取り扱い装置(例えば、排除システム)に排出するために使用されている。

#### 【0030】

下方の電極2は、半導体基板すなわちウェーハWのような処理対象物のベースとして使用されるべき真空チャンバー1の底面上に形成されている。下方の電極2は、好ましくは接地電極であり、上方の電極3は、高周波電源6に接続されている。先にも述べたように、真空処理チャンバー1内への処理ガスの導入と電極3への電源の適用はプロセスプラズマPを活性化し、それによって、反応物とイオン集団(ion population)が、ウェーハW上のパターン化された材料フィルムをエッチングするために形成される。

#### 【0031】

図示されここで述べられる真空処理チャンバー1は、容量結合プラズマ(capacitively coupled plasma) (CCP) リアクタである。しかしながら、この分野の通常の知識を有する人に容易に明かなように、本発明は、ここで論議している材料からそれることなく、多周波数CCPリアクタ、誘電結合プラズマ(inductively coupled plasma) (ICP) リアクタ、電子サイクロトロン共鳴(electron cyclotron resonance) (ECR) リアクタおよびヘリコン(helicon)タイプのリアクタに応用可能である。

#### 【0032】

好ましくは水平方向に延びた薄くて長いのぞき窓1aは、真空処理チャンバー1の周面の一部に取り付けられている。のぞき窓1aは、クォーツガラスのような透明の材料で形成されていて、そこを通して、プラズマPの放射スペクトルを伝達できる。半導体ウェーハWのエッチングプロセスの進行状態を検知するために、のぞき窓1aを通して通過したプラズマPの放射スペクトルは、プラズマエッチングのエンドポイントを検知するためにエンドポイント検知装置A'に案内される。

#### 【0033】

エンドポイント検知装置A'は好ましくは、フォトディテクタ7と計算セクション8とを備えている。フォトディテクタ7は、真空処理チャンバー1ののぞき窓1aから放射された光電的に伝達されるべきプラズマPの放射スペクトルを連続的に検知する。計算セクション8は、ラインS1を介して計算セクション8に送られたフォトディテクタ7の検知信号に基づいたエッチングの進んだ状態を計算する。計算セクション8は、例えば、エンドポイントの検知の電気信号を制御装置9に送るように構成されている。制御装置9は計算セクション8から送られた電気信号に基づいて高周波出力源6の駆動を制御する。上述した構造によれば、予め定められたパターン用に適したエッチングプロセスは、エッチング

のエンドポイントがエンドポイント検知装置A'によって検知されるまで半導体ウェーハ-Wの表面に提供される。

#### 【0034】

フォトディテクタ7は好ましくは、真空処理チャンバー1ののぞき窓1aから放射されたプラズマPの放射スペクトルを集める収差補正レンズ71と、収差補正レンズ71の焦点に備えられた入射スリット72と、入射スリット72を通して通過する放射スペクトルを減少するための絞り73とを備えている。さらにフォトディテクタ7は、絞り73から送られた放射スペクトルを反射するための第1の光学センサー30と、反射鏡74から反射された光を受けるための凹面回折格子75と、第1の受光センサー79とを備えている。第1の受光センサー79は、反射鏡76、77を通して、また、放射スリット78を通つて凹面回折格子75から送られた特定の波長を有する一次回折光(first-order diffracted light)を光電的に伝達するように受ける。凹面回折格子75から送られた一次回折光が、エッチングにおける反応性生物(例えば、酸化ケイ素フィルムの場合のCO\*)である活性化された種の変化を大きく捕捉するために増幅されるように、第1の受光センサー79は好ましくは、受けた光を光電的に増幅する光電子増倍管を備えている。

#### 【0035】

凹面回折格子75は、受光角度が変更できるように形成されている。従って、回折格子75の受光角度が予め定められた角度にセットされた場合、特定の波長を有する一次回折光は、反射鏡76と77および放射スリット78を通して第1の受光センサー79に放射できる。さらに、回折格子75が連続的に回転されると、個別の波長インクレメント(increment)での放射強度は、連続的に記録することができ、広い放射スペクトルを集合できる。インクレメントの分解能(resolution)は、分光計(spectrometer)のデザインに依存する(例えば、数オングストローム)。

#### 【0036】

一般的に、フォトディテクタ7ハードウェア(分光計)は、光分散機構(例えば、格子(grating)など)および/または、波長選択デバイス(例えば、フィルターなど)と、光検知器(例えば、CCDライン配列、CIDライン配列、光電子増倍管など)と、および測定された放射スペクトルを記録するための計算プロセッサとを備えている。フォトディテクタとそのアセンブリの例は、米国特許第5、888、337号に述べられている。これに替わるフォトディテクタの例は、例えば、ピークセンサーシステム(Peak Sensor System)からの高分解能OESセンサーのような、エンドポイント用に構成された高分解能OESセンサーを備えている。そのようなOESセンサーは、紫外(UV)、可視(VIS)および近赤外(NIR)線スペクトルにまたがる広いスペクトルを有している。分解能はほぼ1.4オングストロームで、例えば、センサーは240から1000ナノメートル(nm)の5550波長を集められる。センサーは、2048ピクセル線形CCD配列が一体にされた、高感度小型ファイバーレンズ(optic)UV-VIS-NIR分光計が装着されている。分光計は、単一の、および束ねられた光ファイバーを通して伝達された光を受け、ここで、光ファイバーから出た光は、固定された格子を使用してラインCCD配列を横切って分散される。上述した構造に類似して、光真空窓を通して放射する光は、凸状球面レンズを介して光ファイバーの入口端部に焦点を結ぶ。所定のスペクトル範囲(UV、VISおよびNIR)用に特に回転される3つの分光計は、プロセスチャンバー用のセンサーを形成する。各分光計は、独立したA/Dコンバーターを備えている。そして最後に、センサー使用に応じて、全放射スペクトルは0.1から1.0秒毎に記録できる。

#### 【0037】

図2は、上記で規定されたデバイスを使用して240nmから1000nmで記録された代表的な放射スペクトルを示している。放射強度は、ウェーハ上のプラズマに存在する特定の種の量に関連し、そして、図2で特筆した波長は原子/分子種を示している。図2に示されたような放射スペクトルは、例えば1024の個別の波長で、放射強度の記録を含んでいて、放射スペクトルは、例えば、エッチングプロセス用に毎秒記録できる。従って、エッチングプロセスがほぼ2分の時間である場合、120の個別の放射スペクトルが

記録される。換言すれば、操作者は、UV-VIS-NIRスペクトルにおいて1024の個別の波長で放射強度の時間トレース(time trace)120秒の長さを記録する。

#### 【0038】

フォトディテクタ7によって受けられたデータは、計算セクション8に転送され、ここで、データは計算セクション8内のプロセッサにデジタル的に記録され貯蔵される。即時インタイム(instant in time)での放射スペクトルは、マトリクス[X]の行(row)として貯蔵され、そしてそれゆえ、[X]が一旦アセンブルされると各列は異なった即時インタイムを表わし、各列(column)は、所定の波長用に異なった放射強度を表わす。

#### 【0039】

それ故、この例用に、マトリクス[X]は120掛ける(by)1024、より一般的にはm 10掛けるnの寸法の矩形マトリクスである。データが一旦マトリクスに貯蔵されると、データは好ましくは、所望により平均中心合わせ(mean-center)され、および/または、標準化される。マトリクスの列に貯蔵されたデータを平均中心合わせするプロセスは、列要素の平均値を算出し、各要素からその平均値を差し引くことを含んでいる。さらにマトリクスの列に存在するデータは、列のデータの標準偏差を決定することによって標準化される。

#### 【0040】

以下の記述は、それによってエンドポイント信号がマトリクス[X]に貯蔵されたデータから抽出される方法を議論する。

この方法の初期位相は、エンドポイント信号抽出用の重み係数の選択で開始する。製造環境における実際のエッチングプロセスを有するエンドポイント検知アルゴリズムの利用に 20先立って、放射スペクトルデータの多くのセットがエンドポイント信号に関連しているローディング係数(loading coefficient)のセットが規定されなければならない。一般的に、多変数解析用に、測定されたデータとエンドポイント信号との間の関係は次のように表わされる。

#### 【数1】

$$\overline{XB} = \overline{Y} \quad (1)$$

#### 【0041】

ここで、[X]は、上述したm掛けるnのマトリクスをあらわしていて、[B]はn掛けるp (p < n)のローディング(または、相関関係)マトリクスをあらわしていて、[Y]は、エンドポイント信号を含むm掛けるpのマトリクスをあらわしている。典型的には、PCAを使用した場合、ローディングマトリクス[B]は、列として、共分散(covariance)マトリクス[X]<sup>T</sup>[Y](上付き“T”は行列の入れ替え(transpose)を意味する)の3つまたは4つの最大固有値に対応する固有ベクトル(eigenvector)を含んでいて、ここで、保持された(例えば、3つまたは4つの)固有ベクトルは次元pを規定する。しかしながら、エンドポイント検知用の多変数解析(PCAのような)を使用する他の全ての試みとは異なり、本発明の部分最小自乗(partial least square) (PLS)方法は、エンドポイント信号を“フォース(force)”するために(マトリクス[Y]を“スコア(score)”する 40)、そして、それからPLS解析によって重み係数(マトリクス[B]を“ローディング”する)を導く目標データとして、特定のエッチングプロセス用に、公知のまたは予め定められたエンドポイントデータを採用する。

#### 【0042】

例えば、2つのそのようなエンドポイント信号が図3Aと3Bとに示されている。図3Aは、m掛ける1のマトリクスまたは第1の列[Y]に貯蔵された列ベクトル[y<sub>1</sub>]として表わされ多第1のエンドポイント信号y<sub>1</sub>(t)を示していて、図3Bは、m掛ける1のマトリクスまたは第2の列[Y]に貯蔵された列ベクトル[y<sub>2</sub>]として表わされた第2のエンドポイント信号y<sub>2</sub>(t)を示っていて、換言すれば、

#### 【数2】

$$\bar{Y} = \begin{bmatrix} \bar{y}_1, \bar{y}_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

## 【0043】

この場合において、エンドポイント信号マトリクス[Y]は2つの列を含んでいるけれども、エンドポイント信号マトリクス[Y]は、pの列次元、または、pのエンドポイント信号を有するようにより一般的に表現できる。マトリクス[Y]の初期規定を“フォース”するために採用された目標エンドポイント信号は、特定のエッチングプロセスの放射スペクトル特性の研究において得られた有意な経験から決定されてきた。このエンドポイント信号の初期規定は、光放射データの大きなセットから強固なエンドポイント検知をどのようにして抽出するか、エンドポイント検知モデル（すなわち、ローディングマトリクス[B]の形成）を“トレイン(train)”するためにいまや使用される。さらに、エンドポイント信号またはマトリクス[Y]の列は、最も強固なモデル用に、光放射データとエンドポイント信号との間の関係を最適化するために調整される。

10

## 【0044】

従って、以下はマトリクス[X]用に上記でセットされ、上記で述べた図3Aと3Bとに示されたマトリクス[Y]用のエンドポイント信号を使用した例であり、マトリクス[X]は120掛ける1024の次元を有し、マトリクス[B]は1024掛ける2の次元を有し、マトリクス[Y]は120掛ける2の次元を有する。

20

## 【0045】

データマトリクス[X]とエンドポイント信号マトリクス[Y]とが一旦アセンブル(assembly)されると、[X]と[Y]との間隙を最良に接近するために、また、[X]と[Y]との間の関係を最適にするためにデザインされた関係は、PLS解析を使用して達成される。

## 【0046】

PLSモデルにおいて、マトリクス[X]と[Y]とは次のように分解される：

## 【数3a】

$$\bar{X} = \bar{T}\bar{P}^T + \bar{E}; \quad (3a)$$

30

## 【数3b】

$$\bar{X} = \bar{U}\bar{C}^T + \bar{F}; \quad (3b)$$

および

## 【数3c】

$$\bar{U} = \bar{T} + \bar{H}; \quad (3c)$$

40

ここで、[T]は[X]変数を要約するスコアのマトリクスであり、[P]はマトリクス[X]用のローディングのマトリクスであり、[U]は[Y]変数を要約するスコアのマトリクスであり、[C]は[Y]と[T]（[X]）との間の相関関係を示すウェートのマトリクスであり、[E]、[F]および[H]は残りのマトリクスである。さらに、PLSモデルにおいては、[U]と[X]に相関関係し、[T]を算出するのに使用される重み(weight)と呼ばれる付加的なローディング[W]がある。要約すると、PLS解析は、ライン、平面、または超平面に適するために、オリジナルのデータ表[X]と[Y]によく近似し、また、超平面(hyper plane)上の観察位置間の共分散を最大にする目的で、複数次元空間のポイントとして表わされた[X]と[Y]のデータの両方に構造的に対応

50

する。

【0047】

図4は、[X]と[Y]のPLS解析へのデータ入力と、対応する出力[T]、[P]、[U]、[C]、[W]、[E]、[F]、[H]およびプロジェクションにおける変数重要度(variable importance in the projection)(VIP)の概略を提供する。PLSモデルを支持する商業的に利用可能なソフトウェアの例は、SIMCA-P 8.0である。このソフトウェアのさらなる詳細のために、使用者マニュアル(SIMCA-P 8.0への使用者案内：多変数データ解析における新標準；ウーメトリックス(Umetrics)ABのバージョン8.0、1999年9月)を参照してほしい。

【0048】

PLS解析が一旦完成し、上記出力マトリクスが算出されると、各期間の[Y]マトリクスの影響または[X]マトリクスの列、すなわち、VIPは決定される。VIPは、寄与変数影響(contribution variable influence)の全てのモデルの次元の総計である。与えられたPLS次元用に、 $(VIN)_{ij}^2$ はその期間のPLSウェートの自乗( $w_{ij}$ )<sup>2</sup>に関連する。集積された(全体のPLS次元)値、

【数4】

$$VIP_j = \sum_i (VIN)_{ij}^2, \quad (4)$$

【0049】

がさらなる解析用に使用される。マトリクス[X]における各変数用にVIPが一旦算出されると、それらは分類され、変数の数(可変数)(variable number)に対して下降順にプロットされる。最大のVIPを有するこれらの変数は、マトリクス[Y]のエンドポイントに最大のインパクトを有する。

【0050】

図5は、VIP対変数の数のプロットの例を表わしている。図5から、エンドポイント信号[Y]の与えられた変数の相対的重要性を評価し、それにより、オリジナルデータマトリクス[X]の変数次元nを減少することによって、マトリクス[X]をリファイン(refine)する。最低限のインパクトの変数またはエンドポイント信号への少ない重要性を捨てる(dis card)ために使用された例示的基準は：(1)VIPが、予め特定したしきい値より下がった変数を捨てる；(2)最低の10<sup>th</sup>百分位数(percentile)、または、他の予め定められたある範囲内のVIPと関連されたこれらの変数を捨てる(あるいは、換言すれば、トップの90<sup>th</sup>の百分位数の最大VIPに関連する変数を保持する；百分位数のしきい値または選択された範囲は、ここで述べた90/10の実施例から異なることができることが特筆される)(3)可変数に関するVIPの一次、二次、またはより高次の導関数は、VIP用の値を選択するのに使用され、それ以下で、これらの変数は捨てられる(すなわち、一次または二次導関数の最大、または、一次導関数が予め定められたしきい値傾斜より小さくなった場合)を含んでいる。

【0051】

上述した基準のいずれか1つを使用して、人は、エンドポイント信号の最低限のインパクトを有するこれらの変数を捨てられる。このデータ減少またはリファインは、つぎに、データマトリクス[X]の列空間をp(上述の例において1024)からq(例えば、50の変数)に減少し、また、M掛けるq(120掛ける50)の次元の“新たな”、減少された、またはリファインされたデータマトリクス[X]\*を形成し；いまや、重複決定(over-determine)されたシステムは数(1)に従う。一旦最初のデータ減少が行なわれると、エンドポイント検知用に重要なこれらの変数(すなわち、これらの個別の波長を認識する)を貯蔵できる。その後、データマトリクス[X]\*のリファインまたは減少は達成でき、および/または、方法は、減少されたマトリクス[X]\*を使用してPLSモデルから出力マトリクスを再算出し、貯蔵された個別の波長で測定されたデータとエンドポイント信号との間の関係を確立するためにマトリクス[B]を決定して進行できる。

## 【0052】

この点において、PLSモデルは、減少されたマトリクス  $[X]^*$  がPLS解析の入力として使用されていることを除いて、図4に示された概略に従って繰り返される。出力マトリクスはついで再算出される。上述したように、VIPは、データマトリクス  $[X]^*$  をさらにリファイン(refine)するために図5に関連した記述に従って研究され、または、マトリクス  $[B]$  は、次の関係を使用した出力データから評価される：

## 【数5】

$$\bar{B} = \bar{W}(\bar{P}^T \bar{W})^{-1} \bar{C}^T. \quad (5)$$

10

## 【0053】

データマトリクス  $[X]^*$  が一旦最適化されると、PLS解析を通した最終的経路は、アップデートに一般に要求されるか、または、マトリクス  $[B]$  を算出するために必要な出力マトリクスが再算出される。以下において、数(5)の評価は、サンプリングされたデータマトリクスからエンドポイント信号を抽出するために使用されるべき重み係数のセットに導く。

## 【0054】

上述の議論は、マトリクス  $[B]$  を決定する方法の1つの実施例を提供し、2つのエンドポイント信号  $[y_1]$  と  $[y_2]$  とが開始ポイントとして使用される。しかしながら、PLSモデルは、これに替えてマトリクス  $[Y]$  にアセンブルされた1つまたはそれ以上の最初のエンドポイント信号を有して実行でき、ついで、データマトリクス  $[X]$  とエンドポイント信号  $[Y]$  との間の関係を改良または最適化するために調整が実行される。エンドポイント信号の調整は、エンドポイント信号の形状、図3Aのような変曲点の位置、または図3Bのような信号最小の位置を調整することを含むことができる。

20

## 【0055】

上記実施例は、光放射信号からのデータマトリクス  $[X]$  のアセンブリについて述べているが、しかしながら、特定の時間周期にわたって特定の割合でサンプリングされた他のチャンバー信号がこれに替えて使用され得る。例えば、電気信号または整合ネットワークキャパシタ設定(match network capacitor setting)が、光データに付加して、またはそれに替えて使用でき、マトリクス  $[X]$  の別個の列として貯蔵される。

30

## 【0056】

重み係数を決定するための計算セクション8によって達成された手順100は図6に示されている。ステップ110において、マトリクス  $[X]$  は、測定された光放射データ(および/または、電気的データ、整合ネットワークキャパシタ設定等のような他のデータ)からアセンブル(集合)(assemble)され、各列は、各測定された変数の時間トレース(trace)を表わしている。次にステップ120において、マトリクス  $[Y]$  がプロジェクトされたエンドポイントとアセンブルされ、各列は図3Aと3Bに示されたようなエンドポイント信号を表わす。ステップ130において、マトリクス  $[X]$  とマトリクス  $[Y]$  とは、上述した重み、ローディング、変数重要度およびマトリクス勘定を算出するためにPLS解析モデル内に入力される。ステップ140は、プロジェクションの変数重要度(VIP)データ(図5のように下降順で貯蔵されプロットされた)をプロットし分析(解析)することを含む。そして、ステップ150は、PLS解析から結果を与えられてプロジェクトされたエンドポイント信号マトリクス  $[Y]$  への調整が要求されたかどうかを決定する。そうである場合、エンドポイント信号マトリクス  $[Y]$  は変更されて再アセンブルされ、 $[X]$  と  $[Y]$  マトリクスは、PLS解析に再入力される。そうでない場合、解析はステップ160へ進む。ステップ160は、エンドポイント信号マトリクス  $[X]$  がリファイン(refine)(すなわち減少)されるべきかどうかを決定し、もしそうであれば、対応する新たな重み、ローディング、変数誘導(variable influence)、およびスコアマトリクスを再算出するために、新たなデータマトリクス  $[X]^*$  を有してステップ170に続いてPLS解析を繰り返す。ステップ170において、図5に示されたVIPと関連して述べ

40

50

られた基準は、マトリクス [Y] を新たなマトリクス [X] \* に減少するために使用され、減少されたマトリクスは、エンドポイント信号用に重要でないに見える（すなわち、データ変数とエンドポイント信号との間に弱い相関関係または最小のインパクトが有る）これらの変数(列)を捨てた。マトリクス [X] \* が終了したと一旦決定されると、ステップ 180 は達成される。ステップ 180 は、実際のエンドポイント検知プロセスにおいて後で使用するための数 (5) から相関関係マトリクス [B] を算出することを含む。そしてステップ 190 は、相関関係マトリクス [B] を、エッチングプロセス用に使用されるエンドポイント検知アルゴリズムと合わせることを含む。

#### 【0057】

相関関係マトリクス [B] が一旦評価されると、相関関係マトリクス [B] は、ウェーハ 10  
ーからウェーハへ、およびウェーハロットからウェーハロットへ、最小変数可能性  
を有するエッチングプロセスエンドポイントに強固な決定を提供するために、エンドポ  
イント検知アルゴリズムの一部分として使用できる。エンドポイント検知アルゴリズムは、  
一般的に、種々のエッチングプロセスに適用できるけれども、しかしながら、上述したよ  
うに開発された特別の相関関係マトリクス [B] は、特定のリアクタにおける特別のプロ  
セス用に特定される。例えば、酸化エッチングは、図 1 において述べたのと良く類似した  
リアクタで達成されるであろう。図 1 を参照すると、CCP エッチングリアクタが示され  
ていて、ウェーハは、接地された下方の電極（またはチャック電極）の頂上にセットさ  
れるのに対して、上方の電極は、プロセスガスが一旦真空チャンバーに導入されると、プ  
ロセス用プラズマを発生するために出力される。酸化エッチング用の代表的なプロセスガ 20  
ス化学物質は、 $C_4F_8$  /  $CO$  /  $O_2$  /  $Ar$  の種混合 (specie mix) を含むことができる。  
上記で述べたように、このガス混合物の解離とイオン化は、好ましい材料（例えば、 $SiO_2$ ）と反応するために好適なエッチング化学物質に導く。

#### 【0058】

エッチングプロセスがプラズマの点火に続いて一旦活性化されると、上述したような光放  
射センサー、および/または、他の電氣的測定デバイスを備えたエンドポイント監視シス  
テムは、予め特定された割合でデータの記録を開始する。例えば、光放射センサーは、放  
射スペクトルを各 0.1 から 1.0 秒毎に記録することができる。好ましいサンプリング  
割合は、1 ヘルツ (Hz) である。監視システムは、図 6 を支持する物質に述べられたよ  
うな、これらの信号を最も重要なものとしてエンドポイント信号に記録するよう指令され 30  
る。例えば、データ操作時間とデータ貯蔵要求を減少するために、プラズマリアクタから  
分散された光スペクトルを検知するために使用された電荷結合デバイス (CCD) ライン  
配列は、電荷注入デバイス (charge-injection device) (CID) ライン配列と置き換え  
ることができ、重要であると考えられる光の波長に属するこれらの要素（またはピクセル  
）のみが記録される CID 配列とは異なり、CCD 配列のすべての要素は読まなければ  
ならない。光放射データ（および/または、他のデータ信号）の操作が、エッチングプ  
ロセス中に 1 つの即時インタイム用に一旦完了すると、行はデータマトリクス [X] 内に  
満たされる。図 1 のハードウェアの計算セクション 8 を使い、数 (5) に従うと、データ  
マトリクス [X] の行ベクトルは、1 つまたはそれ以上のエンドポイント信号の 1 つのデ 40  
ータポイントを算出するために、マトリクス [B] の 1 つまたはそれ以上の重み (列) ベ  
クトル上にプロジェクトされる。エッチングプロセスが進み、データ (マトリクス [X]  
の行) が満たされると、1 つまたはそれ以上のエンドポイント信号は、図 3 A と 3 B のそ  
れらと非常に類似してインタイムに発展する。これらのエンドポイント信号がインタイム  
に発展するにつれて、その様な信号のエンドポイントを検知するための手段は、図 3 A と  
3 B に示されたそれらのように装備される。

#### 【0059】

図 7 は、本発明によるエッチングプロセスの終りを監視し検知するために使用された代表  
的なステップ 200 を示している。この方法は、エッチングプロセス用にチャンバー状態  
をセットアップすることによって、一般的にステップ 210 で始まる。例えば、チャンバ  
ーセットアップは、処理されるべき基板を装填し、真空チャンバー（例えば、図 1 に示さ 50



れたような真空チャンバー)を基本圧力まで引き下げ、プロセスガスの流れを開始し、そしてチャンバー処理圧力を確立するために真空ポンプの絞りを調整することを含む。ステップ220において、プラズマは、図1を参照して上述したように、上方の電極へのRF出力の適用によって点火され、それによってエッチングプロセスが開始される。ステップ230は、第1の即時インタイムで測定されたデータの第2のセットを記録することを含む。データサンプリング中、データは、エンドポイントが達成されるまで、2番目の、……n番目の即時インタイムに記録される。ステップ240は、記録されたデータベクトル(各変数はベクトル次元として役立つ)を、ベクトル掛け算(またはマトリクス掛け算)によって1つまたはそれ以上のウェーティングベクトル上にプロジェクトすることを含んでいる。ステップ250は、1つまたはそれ以上のエンドポイント信号をプロットしアップデート(もし必要ならば)する。プロットはインタイムに発展したように図3Aと3Bに示されたのと同様に見える。ステップ260において、エンドポイント信号の検査からエンドポイントが達成されたかどうか決定される。エンドポイントが達成されていると、次にこの方法はステップ270に進む。エンドポイントが達成されていないと、次にこの方法はエッチングプロセスと測定されたデータのサンプリングを規定の間隔(例えば、各1秒毎に)で継続する。ステップ270において、エンドポイントは達成され、そして、この点において、上方の電極に適用されたRF出力は制御装置9によって遮断され、プラズマは消失し、そしてエッチングプロセスは急速に停止される。本発明は好都合にも、存在するまたは人為的な信号がエンドポイント検知用に目標をセットするのに使用される装置と方法を提供する。更なる利点として、最も関連したエンドポイント信号を有する波長が、エンドポイント信号を決定するのに選択され使用される。さらに本発明は、異なった形状のエンドポイント信号のような幾つかのタイプのエンドポイント信号が使用できる装置と方法とを提供する。目標を変更することによって、異なった信号パターンが抽出できる。

#### 【0060】

本発明はさらに好都合にも、PLS解析を使用する装置と方法とを提供する。PLS解析は、大きな変化を有する信号を抽出するために試みるのみでなく、これらの信号が目標変数と最も相関関係が有ることを見出す。他の方法は、PCAおよび目標を有していない他のファクター解析方法を使用する。PCAによって抽出された信号は、エンドポイント情報を含んでいることもあり、含んでいないこともある。これに対して、本発明のPLS解析は、モデルがマトリクス[Y](すなわち、エンドポイント検知信号)のパターンを習うように仕向ける。PCAは、エンドポイント信号を与えないけれども、PLS解析の使用は、エンドポイント信号を有する直接OESデータに相互関連し、エンドポイントパターンを抽出する可能性を最大にする。

#### 【図面の簡単な説明】

#### 【0061】

【図1】本発明の実施例によるエッチングプロセスエンドポイントを検知するためのプラズマエッチングリアクタとエンドポイント検知装置を示す図。

【図2】図1に示されたデバイスを使用して240nmから1000nmで記録された放射スペクトルを示す図。

【図3A】第1のエンドポイント信号 $y_1(t)$ を示す図。

【図3B】第2のエンドポイント信号 $y_2(t)$ を示す図。

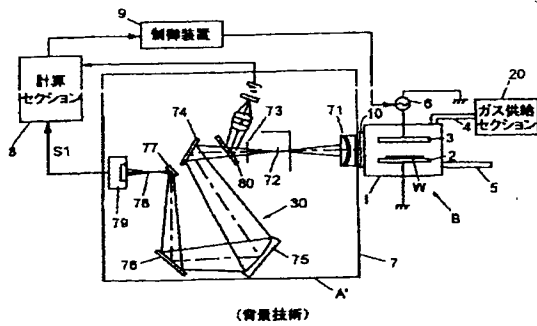
【図4】本発明の実施例の部分最小自乗解析へのデータ入力と対応する出力とを概略的に表わしている図。

【図5】プロジェクションの変数重要度(VIP)の値対可変数の値の例示的プロットを示す図。

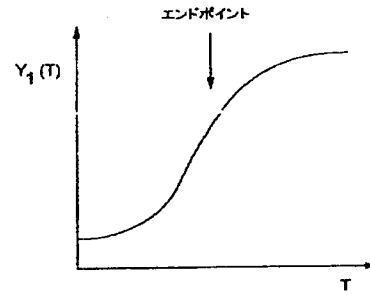
【図6】本発明の実施例による重み係数を決定する方法のフローダイアグラム。

【図7】本発明の実施例によるエッチングプロセスのエンドポイントを監視し検知するための方法のフローダイアグラム。

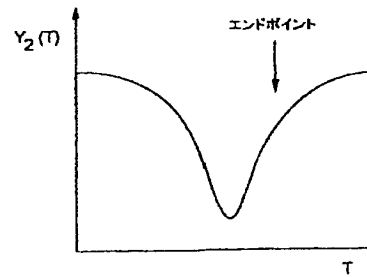
【図 1】



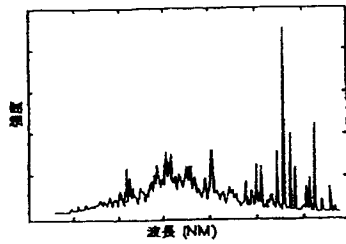
【図 3 A】



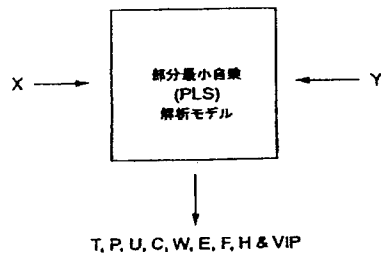
【図 3 B】



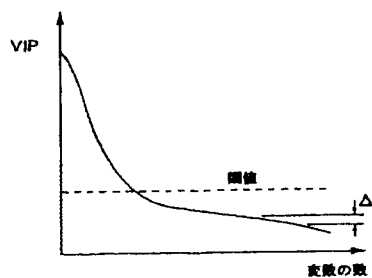
【図 2】



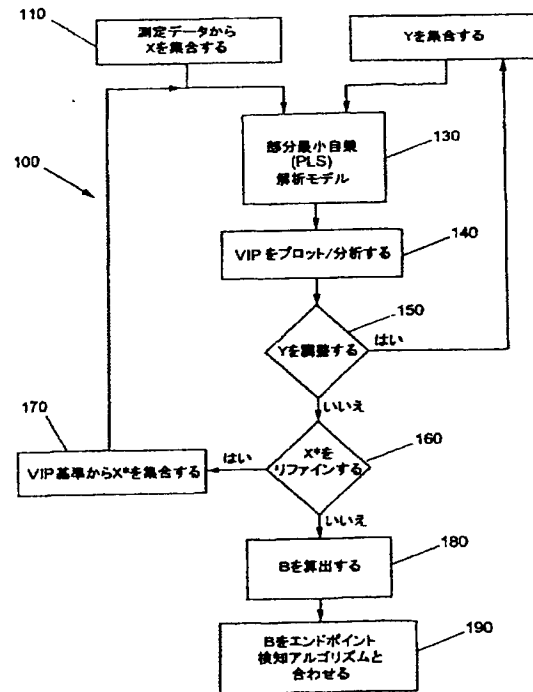
【図 4】



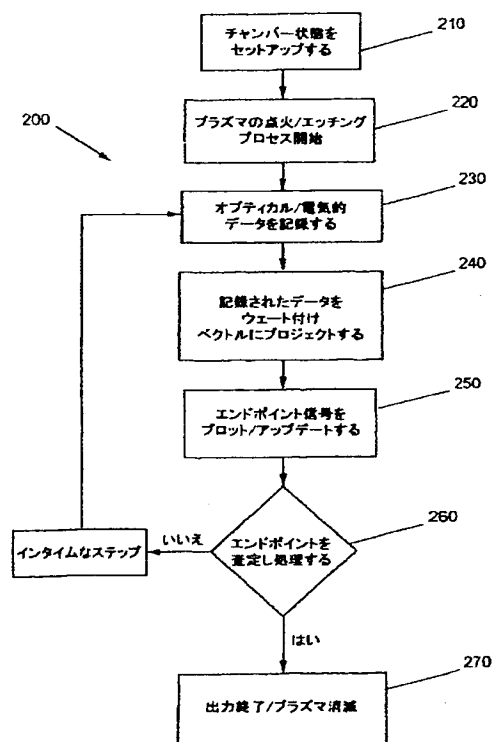
【図 5】



【図 6】



【図 7】



**(19) World Intellectual Property Organization**  
International Bureau



**(43) International Publication Date**  
**3 October 2002 (03.10.2002)**

**(10) International Publication Number**  
**WO 02/077589 A2**

**PCT**

**(51) International Patent Classification<sup>7</sup>:** G01J/457

**(21) International Application Number:** PCT/US02/09073

**(22) International Filing Date:** 25 March 2002 (25.03.2002)

(25) Filing Language: English

(26) **Publication Language:** English

(30) **Priority Data:**  
60/277,981 23 March 2001 (23.03.2001) US

(71) **Applicant** (for all designated States except US): **TOKYO ELECTRON LIMITED** [JP/JP]; TBS Broadcast Center, 3-6, Akasaka 5-chome, Minato-ku, Tokyo 107-8481 (JP).

**(71) Applicant and**

(72) **Inventor:** **FATKE, David** [—/US]; 8000 David Mountain Cove, Austin, TX 78726 (US).

**(72) Inventor; and**

(75) **Inventor/Applicant** (for US only): **YUE, Hongyu**  
[—/US]; 5705 Janabyrd Lane, Austin, TX 78749 (US).

(74) **Agent: CASEY, Michael, R.;** Oblon, Spivak, McClelland, Maier & Neustadt, P.C., Fourth Floor, 1755 Jefferson Davis Highway, Arlington, VA 22202 (US).

**(81) Designated States (national):** AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NO, NZ, OM, PH, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

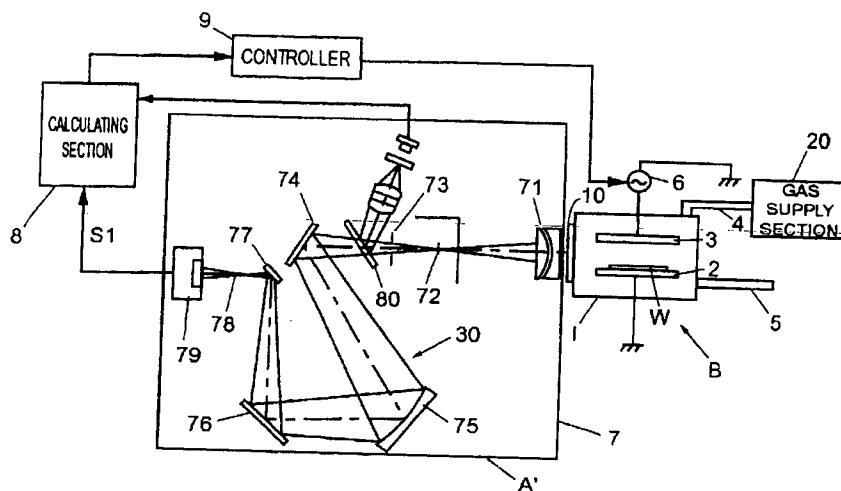
**(84) Designated States (regional):** ARIPO patent (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), Eurasian patent (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), European patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR), OAPI patent (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

**Published:**

— without international search report and to be republished upon receipt of that report

[Continued on next page]

**(54) Title:** METHOD AND APPARATUS FOR ENDPOINT DETECTION USING PARTIAL LEAST SQUARES



**(57) Abstract:** An apparatus and method for detection of a feature etch completion within an etching reactor. The method includes determining a correlation matrix by recording first measured data regarding a first etch process over successive time intervals to form a first recorded data matrix, assembling a first endpoint signal matrix using target endpoint data for a specific etch process, performing a partial least squares analysis on the recorded data matrix and the first endpoint signal matrix to refine the recorded data matrix, and computing a correlation matrix based upon the refined recorded data matrix and the first endpoint signal matrix. The method further includes performing a second etch process to form a second recorded data matrix. The correlation matrix and the second recorded data matrix are analyzed to determine whether an endpoint of the second etch process has been achieved.

**WO 02/077589 A2**



---

*For two-letter codes and other abbreviations, refer to the "Guidance Notes on Codes and Abbreviations" appearing at the beginning of each regular issue of the PCT Gazette.*

TITLE OF THE INVENTION  
METHOD AND APPARATUS FOR ENDPOINT  
DETECTION USING PARTIAL LEAST SQUARES

CROSS-REFERENCE TO RELATED APPLICATIONS

This application claims priority to U.S. Application Serial No. 60/277,981, filed on March 23, 2001. The contents of this application are incorporated herein by reference.

BACKGROUND OF THE INVENTION

FIELD OF THE INVENTION

The present invention relates generally to endpoint detection during semiconductor manufacturing.

DISCUSSION OF THE BACKGROUND

The inventors have identified problems with conventional processing reactors and methods of using those reactors that are solved by the present invention.

Typically, during semiconductor processing, a (dry) plasma etch process is utilized to remove or etch material along fine lines or within vias or contacts patterned on a silicon substrate. The plasma etch process generally involves positioning a semiconductor substrate with an overlying patterned, protective layer, for example a photoresist layer, into a processing chamber. Once the substrate is positioned within the chamber, an ionizable, dissociative gas mixture is introduced within the chamber at a pre-specified flow rate, while a vacuum pump is throttled to achieve an ambient process pressure. Thereafter, a plasma is formed when a fraction of the gas species present are ionized by electrons heated via the transfer of radio frequency (RF) power either inductively or capacitively, or microwave power using, for example, electron cyclotron resonance (ECR). Moreover, the heated electrons serve to dissociate some species of the ambient gas species and create reactant specie(s) suitable for the exposed surface etch chemistry. Once the plasma is formed, any exposed surfaces of the substrate are etched by the plasma. The process is adjusted to achieve optimal conditions, including an appropriate concentration of desirable reactant and ion populations to etch various features (e.g., trenches, vias, contacts, etc.) in the exposed regions of substrate.

Such substrate materials where etching is required include silicon dioxide ( $\text{SiO}_2$ ), poly-silicon and silicon nitride.

As the feature size shrinks and the number and complexity of the etch process steps used during integrated circuit (IC) fabrication escalate, the requirements for tight process control become more stringent. Consequently, real time monitoring and control of such processes becomes increasingly important in the manufacture of semiconductor ICs. For example, one such monitoring and control diagnostic necessary for the timely completion of an etch step or process is endpoint detection.

Endpoint detection refers to the control of an etch step and, in particular, to the detection of the feature etch completion or the exact instant in time when the etch front reaches the etch stop layer. If the etch process endpoint is improperly detected, then severe under-cutting of the feature may occur due to over-etching or partially complete features may result due to underetching. As a result, poor endpoint detection could lead to devices of poor quality that are subject to increased risk of failure. Therefore, the accurate and precise completion of an etch process is an important area for concern during the manufacturing process.

One approach used for endpoint detection is to monitor the emission intensity of light at a pre-specified wavelength in time using optical emission spectroscopy (OES). Such a method might identify a wavelength corresponding to a chemical species present in the etch process that shows a pronounced transition at the etch process endpoint. Subsequently, a resultant signal is analyzed to detect distinct variations in the emission intensity which, and the analysis of the resulting signal is then used to correlate with the completion of an etch process. Typically, the species selected corresponds to a reactive species or a volatile etch product. For example, the selected wavelength may correspond to  $\text{CO}^*$  emission when etching  $\text{SiO}_2$  and polymer films,  $\text{N}_2^*$  or  $\text{CN}^*$  emission when etching nitride films,  $\text{SiF}^*$  emission when etching poly-silicon and  $\text{AlCl}^*$  emission when etching aluminum.

In addition to the approach of monitoring the emission intensity at a single wavelength as described above, another approach is to monitor the light intensity at two wavelengths and record the ratio (or some mathematical manipulation thereof) of the two intensities. For instance, one wavelength is chosen for a specie whose concentration decays at an endpoint and a second wavelength is chosen for a specie whose concentration increases at the endpoint. Therefore, the ratio gives improved signal to noise.

However, as the IC device sizes have decreased, and the exposed open areas have correspondingly decreased, single and dual wavelength endpoint detection schemes have found limited use due to their reduced robustness for extracting a low signal-to-noise (S/N) endpoint signal from the process. Subsequently, process engineers have been presented with the formidable challenge of selecting the right wavelengths with sufficient robustness in a manufacturing environment and, as a result, more sophisticated endpoint detection schemes have arisen. The sophisticated endpoint detection schemes sample data at thousands of wavelengths (i.e. a broad emission spectrum is recorded at each instant in time during the etch process) and multivariate data analysis techniques such as Principal Component Analysis (PCA) are applied to extract the endpoint signal.

In PCA, several techniques, including eigenvalue analysis, singular value decomposition (SVD), and nonlinear partial least-squares (NiPALS) have been employed to identify the principal directions in the multi-dimensional space, where the variance in the data scatter is greatest. The dimension of the multi-dimensional space is equivalent to the number of variables recorded, i.e. the number of discrete wavelengths of the emission intensity are recorded. And therefore, PCA will identify the directions in the multi-dimensional space where the variations in the emission intensity are greatest. In other words, the principal component acts as a series of weighting coefficients for each variable. Typically, the first three or four principal components (corresponding to the three or four largest eigenvalues) are selected and employed for deriving the three or four endpoint signals from the newly recorded data. However, a shortcoming of the use of PCA for multivariate analysis of optical emission data includes the mathematical rigor and complexity such an analysis entails, and, more importantly, the lack of use of physical criteria associated with the etch process to extract a reduced set of data including the endpoint signal(s).

Therefore, what is needed is an improved apparatus and method for endpoint detection which overcomes the shortcomings identified above.

### SUMMARY OF THE INVENTION

Accordingly, the present invention advantageously provides an apparatus and a method for improved detection of a feature etch completion.

An embodiment of the present invention advantageously provides a method including the steps of determining a correlation matrix by recording first measured data regarding a first etch process over successive time intervals to form a first recorded data matrix, assembling a



first endpoint signal matrix using target endpoint data for a specific etch process, performing a partial least squares analysis on the first recorded data matrix and the first endpoint signal matrix to refine the first recorded data matrix, and computing a correlation matrix based upon the refined recorded data matrix and the first endpoint signal matrix. The method further includes performing a second etch process to form a second recorded data matrix, where the correlation matrix and the second recorded data matrix are analyzed to determine whether an endpoint of the second etch process has been achieved.

The preferred embodiment of the method of the present invention is defined such that the step of performing a partial least squares analysis includes the steps of calculating variable importance in projection data defined as an influence on the first endpoint signal matrix of the first measured data, and refining the first recorded data matrix based upon an analysis of the variable importance in projection data. The step of refining the first recorded data matrix includes analyzing the variable importance in projection data to determine if a variable within the first recorded data matrix can be eliminated as having minimal impact on the first endpoint signal matrix. The variable used discarded during refinement can be defined as having a variable importance in projection data value below a predetermined threshold value, or within a predetermined range. Alternatively, the refinement can be defined such that at least a first derivative of a variable importance in projection data value with respect to a variable number is used to select a threshold value for the variable importance in projection data below which the variable is discarded.

The preferred embodiment of the method is defined such that the step of performing a second etch process includes the steps of initiating the second etch process within a processing chamber, recording second measured data regarding the second etch process over successive time intervals to form the second recorded data matrix of at least one recorded data vector, calculating at least one endpoint signal by multiplying the at least one recorded data vector and at least one weighting vector of the correlation matrix, determining whether the endpoint has been achieved by inspecting the at least one end point signal, and stopping the etch process when the endpoint has been achieved.

In the preferred embodiment, the first etch process and the second etch process are performed within a single processing chamber. The correlation matrix is preferably calculated for a selected etch process performed within a selected processing chamber. The target data is preferably determined by experimentation within a selected processing chamber, and the selected processing chamber is utilized for the second etch process. In the preferred

embodiment, the measured data is optical emission data, however alternatively the measured data can be electrical signal data and/or match network capacitor setting data.

In the preferred embodiment, the first recorded data matrix, the first endpoint signal matrix, and the correlation matrix are defined by a relationship:

$$\overline{XB} = \overline{Y},$$

where  $\overline{X}$  represents the first recorded data matrix having m by n data points,  $\overline{B}$  represents the correlation matrix having n by p data points, and  $\overline{Y}$  represents the first endpoint signal matrix having m by p data points. The data of a given instant in time within the first recorded data matrix and the second recorded data matrix is preferably mean-centered by computing a mean value of elements in a column of a respective matrix and subtracting the mean value from each element, or normalized by determining a standard deviation of data in a column of a respective matrix.

An embodiment of the present invention advantageously provides an apparatus including an etching reactor configured to perform an etch process therein, where the etch process is driven by a power source connected to the etching reactor, and an end-point detector for detecting an endpoint of the etching process. The end-point detector includes a detecting section configured to sequentially detect data relating to the etch process within the etching reactor. The endpoint detector further includes a calculating section configured to determine a correlation matrix using first measured data regarding a first etch process over successive time intervals to form a first recorded data matrix, assemble a first endpoint signal matrix using target endpoint data for a specific etch process, perform a partial least squares analysis on the first recorded data matrix and the first endpoint signal matrix to refine the first recorded data matrix, compute a correlation matrix based upon the refined recorded data matrix and the first endpoint signal matrix, and form a second recorded data matrix for a second etch process. The calculating section is configured to analyze the correlation matrix and the second recorded data matrix and produce an endpoint signal when an endpoint of the second etch process has been achieved. The apparatus further includes a controller configured to receive the endpoint signal from the calculating section, and the controller is configured to control a drive of the power source based upon the endpoint signal.

The preferred embodiment of the apparatus of the present invention is configured such that the detecting section includes a photodetector configured to sequentially detect an emission spectrum within the etching reactor. The photodetector section preferably includes

a high resolution optical emission spectroscopy sensor. The etching reactor preferably includes a vacuum chamber having a view window made of transparent material through which the detecting section detects the emission spectrum.

The preferred etching reactor is a capacitively coupled plasma reactor including a vacuum chamber, a pair of parallel plate electrodes provided within the vacuum chamber, a gas injection line connected to the vacuum chamber, and a gas exhaust line connected to the vacuum chamber, wherein the power source is a high frequency power source connected to one of the pair of parallel plate electrodes. Alternatively, the etching reactor can be a multi-frequency capacitively coupled plasma reactor, an inductively coupled plasma reactor, an electron cyclotron resonance reactor, or a helicon plasma reactor.

In the preferred embodiment, the calculating section is configured to calculate variable importance in projection data defined as an influence on the first endpoint signal matrix of the first measured data, and refine the first recorded data matrix based upon an analysis of the variable importance in projection data. The calculating section is preferably configured to refine the first recorded data matrix by analyzing the variable importance in projection data to determine if a variable within the first recorded data matrix can be eliminated as having minimal impact on the first endpoint signal matrix.

In alternative embodiments, the detecting section is configured to sequentially detect electrical signal data and/or match network capacitor setting data relating to the etch process within the etching reactor.

#### BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS

A more complete appreciation of the invention and many of the attendant advantages thereof will become readily apparent with reference to the following detailed description, particularly when considered in conjunction with the accompanying drawings, in which:

Figure 1 depicts a plasma etching reactor and an end-point detector for detecting an endpoint of an etching process according to an embodiment of the present invention;

Figure 2 depicts an emission spectrum recorded from 240 nm to 1000 nm using the device depicted in Figure 1;

Figure 3A depicts a first endpoint signal  $y_1(t)$ , and Figure 3B depicts a second endpoint signal  $y_2(t)$ ;

Figure 4 is a schematic representation of data inputs to the partial least squares analysis of an embodiment of the present invention, and corresponding outputs;

Figure 5 depicts an exemplary plot of a variable importance in the projection (VIP) values versus variable number values;

Figure 6 is a flow diagram of a method for determining a weighting coefficient according to an embodiment of the present invention; and

Figure 7 is a flow diagram of a method for monitoring and detecting an endpoint of an etch process according to an embodiment of the present invention.

### DESCRIPTION OF THE PREFERRED EMBODIMENTS

As stated above, the inventors have identified problems with conventional processing reactors and methods of using those reactors that are solved by the present invention. Therefore, the present invention provides an improved apparatus and method for endpoint detection which overcomes the shortcomings identified with regard to the conventional processing reactors.

The inventors recognized that it is difficult to accurately detect the endpoint for the etch process of a small open area substrate. As the device sizes shrink, the open area shrinks and consequently the endpoint signal and the signal-to-noise ratio are reduced. What is needed is a simplified multivariate analysis approach for extracting endpoint signal(s) utilizing known physical criteria set by the etch process.

Additionally, the inventors have recognized that it is difficult to repeatedly detect the endpoint for an etch process from wafer-to-wafer. The endpoint detection algorithm must be robust enough to overcome wafer-to-wafer variability in the process conditions. What is needed is a robust algorithm requiring minimal to no operator interaction from wafer-to-wafer.

The inventors have recognized that it is important to select the wavelengths that contain the most informative endpoint signals. As described above, conventional multivariate analysis techniques employed to extract an endpoint signal are mathematically complex and rigorous, and do not include information regarding the process to extract the signal. In PCA, only several principal components are selected for endpoint signal extraction from the data, however the criteria used to select these components can be ad hoc. Therefore, what is needed is a method of selecting important wavelengths and assigning weights utilizing informed decisions based upon the etch process physics. What is needed is set of physical criteria for making informed decisions regarding the selection and removal of wavelengths from the emission spectrum.

The present invention will now be described with reference to preferred embodiments that provide advantageous structures and methods that overcome the problems identified by the inventors which are described above.

Referring now to the drawings, Figure 1 depicts a plasma etching reactor or device B and an end-point detector A' for detecting an endpoint of an etching process, which is processed by the plasma etching device B. The plasma etching device B preferably includes a vacuum process chamber 1 that is formed of a conductive material, such as aluminum, and a pair of parallel plate electrodes 2 and 3 that are provided in the upper and lower portions of the vacuum chamber 1. The electrodes 2 and 3 are provided within the vacuum chamber 1 such that the electrodes 2 and 3 have a predetermined spacing. A gas injection line 4 and a gas exhaust line 5 are connected to the vacuum process chamber 1. The gas injection line 4 is employed to introduce a fluorocarbon (e.g., CF series, such as CF<sub>4</sub>) etching gas into the vacuum chamber 1 from an etching gas supply section 20. The gas exhaust line 5 is used to evacuate unused process gas and reaction effluent generated in the vacuum chamber 1 through a vacuum pump to an outer exhaust handling unit (e.g., an abatement system) of the vacuum chamber 1.

The lower electrode 2 is formed on a bottom surface of the vacuum chamber 1 to be used as a base for mounting a processing object, such as a semiconductor substrate or wafer W. The lower electrode 2 is preferably a ground electrode and the upper electrode 3 is connected to a high frequency power source 6. As described earlier, the introduction of process gas into the vacuum process chamber 1 and the application of power to the electrode 3 activate a processing plasma P, whereby a reactant and ion population is formed suitable for etching the patterned material film on the wafer W.

The vacuum process chamber 1 depicted and described herein is a capacitively coupled plasma (CCP) reactor. However, as will be readily apparent to one of ordinary skill in the art, the present invention is applicable to multi-frequency CCP reactors, inductively coupled plasma (ICP) reactors, electron cyclotron resonance (ECR) reactors and plasma reactors of the helicon type without deviating from the material discussed herein.

A thin and long view window 1a, which is preferably extended in a horizontal direction, is attached to a part of a peripheral surface of the vacuum process chamber 1. The view window 1a is formed of a transparent material such as quartz glass, and can transmit the emission spectrum of plasma P, which is generated in the vacuum process chamber 1, therethrough. In order to detect an advanced state of the etching process of the semiconductor

wafer W, the emission spectrum of plasma P, which is passed through the view window 1a, is guided to the endpoint detector A' for detecting the endpoint of the plasma etching.

The endpoint detector A' preferably includes a photo detector 7 and a calculating section 8. The photo detector 7 sequentially detects the emission spectrum of the plasma P emitted from the view window 1a of the vacuum process chamber 1 to be photoelectrically transferred. The calculating section 8 calculates an advanced state of the etching based on a detection signal of the photo detector 7 sent to the calculating section 8 via line S1. The calculating section 8 is configured to send an electrical signal, for example upon detection of an endpoint, to a controller 9. The controller 9 controls the drive of the high frequency power source 6 based on the electrical signal sent from the calculating section 8. According to the above-mentioned structure, the etching process, which is suitable for a predetermined pattern, is provided to a surface of the semiconductor wafer W until the endpoint of the etching is detected by the endpoint detector A'.

The photodetector 7 preferably includes an aberration corrected lens 71 for converging the emission spectrum of the plasma P emitted from the view window 1a of the vacuum process chamber 1, an incident slit 72, which is provided at a focal point of the aberration corrected lens 71, and a diaphragm 73 for reducing the emission spectrum passed through the incident slit 72. Moreover, the photodetector 7 includes a first optical system 30 that includes a reflection mirror 74 for reflecting the emission spectrum sent from the diaphragm 73, a concave surface diffraction grating 75 for receiving a reflected light sent from the reflection mirror 74, and a first light receiving sensor 79. The first light receiving sensor 79 receives a first-order diffracted light having a specific wavelength sent from the concave surface diffraction grating 75 through reflection mirrors 76, 77 and through an emission slit 78 so as to be photoelectrically transferred. In order that the first-order diffracted light sent from the concave surface diffraction grating 75 is amplified to largely capture the change of an activated species, which is a reaction product in etching (e.g., CO\* in a case of etching a silicon oxide film), the first light-receiving sensor 79 preferably includes a photo-multiplier tube that photoelectrically amplifies the received light.

The concave surface diffraction grating 75 is formed such that the light-receiving angle can be changed. Therefore, when the light receiving angle of the grating 75 is set at a predetermined angle, the first-order diffraction light having a specific wavelength can be emitted to the first light receiving sensor 79 through the reflection mirrors 76 and 77 and the emission slit 78. Moreover, if the grating 75 is sequentially rotated, the emission intensity at

discrete wavelength increments can be sequentially recorded and a broad emission spectrum can be assembled. The increment resolution is dependent upon the spectrometer design (e.g., several Angstroms).

In general, the photodetector hardware (spectrometer) includes a light dispersion mechanism (e.g., grating, etc.) and/or a wavelength selection device (e.g., filter, etc.), a light detector (e.g., CCD line array, CID line array, photo-multiplier tube, etc.), and a computer processor to record the measured emission spectrum. An example of a photodetector, and the assembly thereof, is described in U.S. Patent No. 5,888,337. An alternative example of photodetector includes a high resolution OES sensor configured for endpoint detection, for example a high resolution OES sensor from Peak Sensor Systems. Such an OES sensor has a broad spectrum that spans the ultraviolet (UV), visible (VIS) and near infrared (NIR) light spectrums. The resolution is approximately 1.4 Angstroms, for example the sensor is capable of collecting 5550 wavelengths from 240 to 1000 nm. The sensor is equipped with high sensitivity miniature fiber optic UV-VIS-NIR spectrometers which are, in turn, integrated with 2048 pixel linear CCD arrays. The spectrometers receive light transmitted through single and bundled optical fibers, where the light output from the optical fibers is dispersed across the line CCD array using a fixed grating. Similar to the configuration described above, light emitting through an optical vacuum window is focussed onto the input end of the optical fibers via a convex spherical lens. Three spectrometers, each specifically tuned for a given spectral range (UV, VIS and NIR), form a sensor for a process chamber. Each spectrometer includes an independent A/D converter. And lastly, depending upon the sensor utilization, a full emission spectrum can be recorded every 0.1 to 1.0 seconds.

Figure 2 presents a typical emission spectrum recorded from 240 nm to 1000 nm using the above-defined device. The emission intensity is related to the amount of a specific specie present in the plasma above the wafer and the wavelength as noted in Figure 2 is indicative of the atomic/molecular specie. An emission spectrum such as that depicted in Figure 2 can include a record of the emission intensity at, for example, 1024 discrete wavelengths and the emission spectrum can be recorded, for example, every second for an etch process. Therefore, if the etch process is approximately two minutes in length, then 120 separate emission spectrums are recorded. In other words, the operator records a time trace 120 seconds in length of the emission intensity at 1024 discrete wavelengths in the UV-VIS-NIR spectrum.

The data received by the photodetector 7 is transferred to the calculating section 8, where the data is recorded and stored digitally on a processor within calculating section 8. Each emission spectrum at an instant in time is stored as a row in a matrix  $\bar{X}$  and, hence, once the matrix  $\bar{X}$  is assembled, each row represents a different instant in time and each column represents a different emission intensity for a given wavelength. Hence, for this example, matrix  $\bar{X}$  is a rectangular matrix of dimensions 120 by 1024, or more generally, m by n. Once the data is stored in the matrix, the data is preferably mean-centered and/or normalized, if desired. The process of mean-centering the data stored in a matrix column involves computing a mean value of the column elements and subtracting the mean value from each element. Moreover, the data residing in a column of the matrix is normalized by determining the standard deviation of the data in the column.

The following description discusses the methods by which an endpoint signal(s) is extracted from the data stored in the matrix  $\bar{X}$ .

The initial phase of the method begins with the selection of weighting coefficients for endpoint signal extraction. Prior to utilizing the endpoint detection algorithm with an actual etch process in the manufacturing environment, a set of loading coefficients must be defined which relate the large set of emission spectrum data to the endpoint signal(s). In general, for multivariate analysis, the relationship between the measured data and the endpoint signal is expressed as follows

$$\bar{X}\bar{B}=\bar{Y} \quad (1)$$

where  $\bar{X}$  represents the m by n matrix described above,  $\bar{B}$  represents an n by p ( $p < n$ ) loading (or correlation) matrix and  $\bar{Y}$  represents an m by p matrix containing the endpoint signals. Typically, when using PCA, the loading matrix  $\bar{B}$  includes the eigenvectors corresponding to the three or four largest eigenvalues of the covariance matrix  $\bar{X}^T \bar{X}$  (superscript "T" denotes transpose) as columns, where the number of eigenvectors retained (e.g., three or four) defines the dimension p. However, unlike all other attempts to utilize multivariate analysis (such as PCA) for endpoint detection, the partial least squares (PLS) method of the present invention employs known or predetermined endpoint data for a specific etch process as target data to "force" the endpoint signal ("scores" matrix  $\bar{Y}$ ), and therefrom derive the weighting coefficients ("loading" matrix  $\bar{B}$ ) by PLS analysis.



For instance, two such endpoint signals are depicted in Figures 3A and 3B. Figure 3A presents a first endpoint signal  $y_1(t)$  which may be represented as an  $m$  by 1 matrix or column vector  $\overline{y_1}$ , stored in the first column of  $\overline{Y}$ , and Figure 3B presents a second endpoint signal  $y_2(t)$  which may be represented as an  $m$  by 1 matrix or column vector  $\overline{y_2}$ , stored in the second column of  $\overline{Y}$ , viz.

$$\overline{Y} = \begin{bmatrix} \overline{y_1} & \overline{y_2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

In this case, the endpoint signal matrix  $\overline{Y}$  includes two columns, however, the endpoint signal matrix  $\overline{Y}$  may be expressed more generally as having a column dimension of  $p$ , or  $p$  endpoint signals. The target endpoint signals employed to "force" the initial definition of the matrix  $\overline{Y}$  have been determined from significant experience obtained in studying the emission spectrum properties of a particular etch process. This initial definition of the endpoint signal will now be used to "train" the endpoint detection model (i.e., the formation of the loading matrix  $\overline{B}$ ) how to extract a robust endpoint signal from a large set of optical emission data. Furthermore, the endpoint signals or columns in matrix  $\overline{Y}$  may be adjusted in order to optimize the relationship between the optical emission data and the endpoint signals for the most robust model.

Therefore, following the example set above for matrix  $\overline{X}$  and using the endpoint signals set for matrix  $\overline{Y}$  depicted in Figures 3A and 3B described above, matrix  $\overline{X}$  will have dimensions of 120 by 1024, matrix  $\overline{B}$  will have dimensions of 1024 by 2, and matrix  $\overline{Y}$  will have dimensions 120 by 2.

Once the data matrix  $\overline{X}$  and the endpoint signal matrix  $\overline{Y}$  are assembled, a relationship designed to best approximate the  $\overline{X}$  and  $\overline{Y}$  spaces and to maximize the correlation between  $\overline{X}$  and  $\overline{Y}$  is established using PLS analysis.

In the PLS model, the matrices  $\overline{X}$  and  $\overline{Y}$  are decomposed as follows:

$$\overline{X} = \overline{TP}^T + \overline{E}; \quad (3a)$$

$$\overline{X} = \overline{UC}^T + \overline{F}; \quad (3b)$$

and

$$\bar{U} = \bar{T} + \bar{H}; \quad (3c)$$

where  $\bar{T}$  is a matrix of scores that summarizes the  $\bar{X}$  variables,  $\bar{P}$  is a matrix of loadings for matrix  $\bar{X}$ ,  $\bar{U}$  is a matrix of scores that summarizes the  $\bar{Y}$  variables,  $\bar{C}$  is a matrix of weights expressing the correlation between  $\bar{Y}$  and  $\bar{T}(\bar{X})$ , and  $\bar{E}$ ,  $\bar{F}$  and  $\bar{H}$  are matrices of residuals. Furthermore, in the PLS model, there are additional loadings  $\bar{W}$  called weights that correlate  $\bar{U}$  and  $\bar{X}$ , and are used to calculate  $\bar{T}$ . In summary, the PLS analysis geometrically corresponds to fitting a line, plane or hyper plane to both the  $\bar{X}$  and  $\bar{Y}$  data represented as points in a multidimensional space, with the objective of well approximating the original data tables  $\bar{X}$  and  $\bar{Y}$ , and maximizing the covariance between the observation positions on the hyper planes.

Figure 4 provides a schematic representation of the data inputs,  $\bar{X}$  and  $\bar{Y}$ , to the PLS analysis and the corresponding outputs  $\bar{T}$ ,  $\bar{P}$ ,  $\bar{U}$ ,  $\bar{C}$ ,  $\bar{W}$ ,  $\bar{E}$ ,  $\bar{F}$ ,  $\bar{H}$  and variable importance in the projection (VIP). An example of a commercially available software which supports PLS modeling is SIMCA-P 8.0. For further details on this software see the User's Manual (User Guide to SIMCA-P 8.0: A new standard in multivariate data analysis, Umetrics AB, Version 8.0, September 1999).

Once the PLS analysis is complete and the above output matrices have been computed, the influence on the  $\bar{Y}$  matrix of every term or column in the  $\bar{X}$  matrix, namely, the VIP is determined. VIP is the sum over all model dimensions of the contributions variable influence (VIN). For a given PLS dimension,  $(VIN)_{ij}^2$  is related to the squared PLS weight  $(w_{ij})^2$  of that term. The accumulated (over all PLS dimensions) value,

$$VIP_j = \sum_i (VIN)_{ij}^2, \quad (4)$$

is used for further analysis. Once the VIPs are computed for each variable in matrix  $\bar{X}$ , they may be sorted and plotted in descending order against the variable number. Those variables with the largest VIP will have the greatest impact on the endpoint signals in matrix  $\bar{Y}$ .

Figure 5 depicts an exemplary plot of the VIPs versus the variable number. From Figure 5, one may assess the relative significance of a given variable on the endpoint signals

$\bar{Y}$ , and thereby refine the data matrix  $\bar{X}$  by reducing the variable dimension  $n$  of the original data matrix  $\bar{X}$ . Exemplary criterion used to discard the variables of minimal impact or little significance to the endpoint signal include: (1) discard those variables whose VIP falls less than a pre-specified threshold; (2) discard those variables associated with VIPs in the lowest 10<sup>th</sup> percentile or within some other predetermined range (or, in other words, retain those variables associated with the largest VIP in the top 90<sup>th</sup> percentile; note that the percentile threshold or range selected can be different from the 90/10 embodiment described herein); and (3) the first, second or higher derivative of the VIP with respect to the variable number may be used to select a value for the VIP, below which those variables are discarded (i.e., a maximum in the first or second derivative, or when the first derivative becomes less than a predetermined threshold slope).

Using any one of the above-mentioned criteria, one may then discard those variables that have minimal impact on the endpoint signal(s). This data reduction or refinement, in turn, reduces the column space of the data matrix  $\bar{X}$  from  $p$  (1024 in the above example) to  $q$  (e.g., 50 variables), and forms a "new", reduced or refined data matrix  $\bar{X}^*$  of dimensions  $m$  by  $q$  (120 by 50); now an over-determined system following equation (1). Once an initial data reduction has taken place, one may store those variables (i.e. identify those discrete wavelengths) important for endpoint detection. Thereafter, further refinement or reduction of the data matrix  $\bar{X}^*$  can be performed and/or the method can proceed with re-computing the output matrices from the PLS model using the reduced data matrix  $\bar{X}^*$  and determining the matrix  $\bar{B}$  for establishing the relationship between the data measured at the stored discrete wavelengths and the endpoint signal(s).

At this point, the PLS model is repeated following the schematic presented in Figure 4, except now the reduced matrix  $\bar{X}^*$  is used as the input to the PLS analysis. The output matrices are then recomputed. As stated above, the VIPs may be studied following the description associated with Figure 5 to further refine the data matrix  $\bar{X}^*$ , or the matrix  $\bar{B}$  may be evaluated from the output data using the relationship:

$$\bar{B} = \bar{W} (\bar{P}^T \bar{W})^{-1} \bar{C}^T. \quad (5)$$

Once the data matrix  $\bar{X}^*$  has been optimized, a final pass through the PLS analysis is generally required to update or re-compute the output matrices necessary for computing the matrix  $\bar{B}$ . Hereinafter, the evaluation of equation (5) leads to a set of weighting coefficients to be used for extracting the endpoint signal from the sampled data matrix.

The above discussion provides one embodiment of a method of determining the matrix  $\bar{B}$ , where two endpoint signals  $\bar{y}_1$  and  $\bar{y}_2$  are used as starting points. However, the PLS model can alternatively be executed with one or more initial endpoint signals assembled in matrix  $\bar{Y}$  that are, in turn, subject to adjustment in order to improve or optimize the relationship between the data matrix  $\bar{X}$  and the endpoint signals  $\bar{Y}$ . Adjustments to the endpoint signals can include adjustments of the endpoint signal shape, the position of the inflection point as in Figure 3A, or the position of the signal minimum as in Figure 3B.

The above embodiment describes the assembly of data matrix  $\bar{X}$  from optical emission signals, however other chamber signals sampled over specified time periods at specified rates can alternatively be utilized. For example, other chamber signals such as electrical signals or match network capacitor settings can be used in addition to or in place of the optical data, and stored as separate columns in the matrix  $\bar{X}$ .

The procedures 100 performed by the calculating section 8 for determining the weighting coefficients are presented in Figure 6. In step 110, the matrix  $\bar{X}$  is assembled from the measured optical emission data (and/or other data such as electrical signals, match network capacitor settings, etc.), where each column represents a time trace of each measured variable. Then in step 120, the matrix  $\bar{Y}$  is assembled with projected endpoints, where each column represents an endpoint signal such as that depicted in Figures 3A and 3B. In step 130, matrices  $\bar{X}$  and  $\bar{Y}$  are input into the PLS analysis model to compute the above described weighting, loading, variable influence and score matrices. Step 140 includes plotting and analyzing the variable importance in projection (VIP) data (sorted and plotted in descending order as in Figure 5). And step 150 determines whether, given the results from the PLS analysis, adjustments to the projected endpoint signal matrix  $\bar{Y}$  are required. If so, the matrix  $\bar{Y}$  is re-assembled with the changes and the  $\bar{X}$  and  $\bar{Y}$  matrices are re-entered into the PLS analysis. If not, the analysis proceeds to step 160. Step 160 determines whether the matrix  $\bar{X}$  is to be refined (i.e. reduced), and, if so, then repeats the PLS analysis following step 170 with the new data matrix  $\bar{X}^*$  in order to re-compute the corresponding new weighting,

loading, variable influence, and score matrices. In step 170, the criterion described in association with the VIP information presented in Figure 5 are utilized to reduce the matrix  $\bar{X}$  to a new matrix  $\bar{X}^*$ , where the reduced matrix has discarded those variables (columns) deemed unimportant for the endpoint signal (i.e., there is a weak correlation or minimal impact between the data variable and the endpoint signal(s)). Once it has been determined that matrix  $\bar{X}^*$  is finalized, step 180 is performed. Step 180 includes computing the correlation matrix  $\bar{B}$  from equation (5) for later use in an actual endpoint detection process. And step 190 includes incorporating the correlation matrix  $\bar{B}$  with the endpoint detection algorithm used for an etch process.

Once the correlation matrix  $\bar{B}$  has been evaluated, the correlation matrix  $\bar{B}$  can be used as part of an endpoint detection algorithm to provide robust determination of the etch process endpoint with minimal variability from wafer-to-wafer and from wafer lot-to-wafer lot. The endpoint detection algorithm can, in general, be applied to a variety of etch processes, however, the specific correlation matrix  $\bar{B}$  developed as described above will be specific to a particular process in a specific reactor. For example, oxide etching may be performed in a reactor much like that described in Figure 1. With reference to Figure 1, a CCP etch reactor was described where a wafer is set atop a grounded lower electrode (or chuck electrode) while an upper electrode is powered to generate a processing plasma once the process gas is introduced to the vacuum chamber. A typical process gas chemistry for oxide etch can include a specie mix of  $C_4F_8/CO/O_2/Ar$ . As stated above, the dissociation and ionization of this gas mixture leads to an etch chemistry suitable for reacting with the preferred material (e.g.,  $SiO_2$ ).

Once the etch process is activated following the ignition of a plasma, the endpoint monitoring system including optical emission sensors, as described above, and/or other electrical measurement devices begin to record data at a pre-specified rate. For instance, the optical emission sensors are capable of recording the emission spectrum every 0.1 to 1.0 second. A preferred sampling rate is one Hertz (Hz). The monitoring system is instructed to record those signals most important to the endpoint signal as described in the material supporting Figure 6. For example, in order to reduce the data scan time and data storage requirements, the charge-coupled device (CCD) line array used to detect the dispersed light spectrum from the plasma reactor may be replaced with a charge-injection device (CID) line array, where only those elements (or pixels) are recorded that pertain to wavelengths of light

deemed important (unlike the CID array, all elements in the CCD array must be read). Once a scan of optical emission data (and/or other data signals) is complete for one instant in time during the etch process, a row is filled in the data matrix  $\overline{X}$ . Using the calculating section 8 of the hardware in Figure 1 and following equation (5), the row vector of data matrix  $\overline{X}$  is projected onto the one or more weighting (column) vectors stored in matrix  $\overline{B}$  in order to compute one data point in the one or more endpoint signals. As the etch process proceeds and data (rows in matrix  $\overline{X}$ ) are filled, the one or more endpoint signals are evolved in time, much like those in Figures 3A and 3B. As these endpoint signals are evolved in time, the means for detecting the endpoint in such a signal will be implemented such as those depicted in Figures 3A and 3B.

Figure 7 presents the typical steps 200 utilized for monitoring and detecting the end of an etch process according to the present invention. The method generally begins with step 210 by setting up the chamber conditions for the etch process. For example, the chamber setup includes loading the substrate to be processed, pumping down the vacuum chamber (for example, the vacuum chamber as depicted in Figure 1) to a base pressure, initiating the flow of process gas, and adjusting the vacuum pump throttle valve to establish the chamber process pressure. In step 220, the plasma is ignited via the application of RF power to the upper electrode as discussed with reference to Figure 1, thereby initiating the etch process. Step 230 includes recording a second set of measured data at a first instant in time. During the data sampling, the data will be recorded at second, ..., nth instants in time, until an endpoint is reached. Step 240 includes projecting the recorded data vector (each variable serves as a vector dimension) onto the one or more weighting vectors via vector multiplication (or matrix multiplication). Step 250 includes plotting and updating (if necessary) the one or more endpoint signals. The plots will look much like that presented in Figures 3A and 3B as they evolve in time. In Step 260, it is determined from inspection of the endpoint signal(s), whether an endpoint has been achieved. If the endpoint has been achieved, then the method proceeds with step 270. If the endpoint has not been achieved, then the method continues with the etch process and sampling of the measured data at regular intervals (e.g., every 1 second). In step 270, the endpoint has been achieved and, at this point, the RF power applied to the upper electrode is shut down by controller 9, the plasma is extinguished, and the etch process is brought to an abrupt stop.

The present invention advantageously provides an apparatus and a method where an existing or artificial signal is used to set the target for endpoint detection. Further advantageously, the wavelengths with the most relevant endpoint signal are selected and utilized to determine the endpoint signals. Additionally, the present invention provides an apparatus and a method where several types of endpoint signals can be utilized, such as endpoint signals with different shapes. By changing the target, different signal patterns can be extracted.

The present invention further advantageously provides an apparatus and a method that utilizes PLS analysis. PLS analysis not only tries to extract signals with large variance, but also finds those signals that correlate most with the target variables. Other methods use PCA and other factor analysis methods that do not have a target. The extracted signal by PCA may or may not contain endpoint information. To the contrary, the PLS analysis of the present invention forces the model to learn the pattern in matrix  $\bar{Y}$  (i.e., the endpoint detection signal(s)). PCA may not give you an endpoint signal, while the use of PLS analysis directly correlates OES data with the endpoint signal and maximizes the possibility to extract endpoint pattern.

Numerous modifications and variations of the present invention are possible in light of the above teachings. It is therefore to be understood that, within the scope of the appended claims, the invention may be practiced otherwise than as specifically described herein.

CLAIMS:

1. A method for detection of a feature etch completion, the method comprising the steps of:
  - determining a correlation matrix by:
    - recording first measured data regarding a first etch process over successive time intervals to form a first recorded data matrix,
    - assembling a first endpoint signal matrix using target endpoint data for a specific etch process,
    - performing a partial least squares analysis on the first recorded data matrix and the first endpoint signal matrix to refine the first recorded data matrix, and
    - computing a correlation matrix based upon the refined recorded data matrix and the first endpoint signal matrix; and
  - performing a second etch process to form a second recorded data matrix, wherein the correlation matrix and the second recorded data matrix are analyzed to determine whether an endpoint of the second etch process has been achieved.
2. The method according to Claim 1, wherein said step of performing a partial least squares analysis includes the steps of:
  - calculating variable importance in projection data defined as an influence on the first endpoint signal matrix of the first measured data; and
  - refining the first recorded data matrix based upon an analysis of the variable importance in projection data.
3. The method according to Claim 2, wherein the step of refining the first recorded data matrix comprises analyzing the variable importance in projection data to determine if a variable within the first recorded data matrix can be eliminated as having minimal impact on the first endpoint signal matrix.
4. The method according to Claim 3, wherein the variable having a variable importance in projection data value below a predetermined threshold value is discarded.
5. The method according to Claim 3, wherein the variable having a variable importance in projection data value within a predetermined range is discarded.



6. The method according to Claim 3, wherein at least a first derivative of a variable importance in projection data value with respect to a variable number is used to select a threshold value for the variable importance in projection data below which the variable is discarded.

7. The method according to Claim 1, wherein said step of performing a second etch process comprises the steps of:

initiating the second etch process within a processing chamber;

recording second measured data regarding the second etch process over successive time intervals to form the second recorded data matrix of at least one recorded data vector;

calculating at least one endpoint signal by multiplying the at least one recorded data vector and at least one weighting vector of the correlation matrix;

determining whether the endpoint has been achieved by inspecting the at least one endpoint signal; and

stopping the etch process when the endpoint has been achieved.

8. The method according to Claim 1, wherein the first etch process and the second etch process are performed within a single processing chamber.

9. The method according to Claim 1, wherein the correlation matrix is calculated for a selected etch process performed within a selected processing chamber.

10. The method according to Claim 1, wherein the target data is determined by experimentation within a selected processing chamber, and wherein the selected processing chamber is utilized for the second etch process.

11. The method according to Claim 1, wherein the measured data is optical emission data.

12. The method according to Claim 1, wherein the measured data is electrical signal data.

13. The method according to Claim 1, wherein the measured data is match network capacitor setting data.

14. The method according to Claim 1, wherein the first recorded data matrix, the first endpoint signal matrix, and the correlation matrix are defined by a relationship:

$$\overline{XB} = \overline{Y},$$

where  $\overline{X}$  represents the first recorded data matrix having m by n data points,  $\overline{B}$  represents the correlation matrix having n by p data points, and  $\overline{Y}$  represents the first endpoint signal matrix having m by p data points.

15. The method according to Claim 1, wherein data of a given instant in time within the first recorded data matrix and the second recorded data matrix is mean-centered by computing a mean value of elements in a column of a respective matrix and subtracting the mean value from each element.

16. The method according to Claim 1, wherein data of a given instant in time within the first recorded data matrix and the second recorded data matrix is normalized by determining a standard deviation of data in a column of a respective matrix.

17. An apparatus comprising:

an etching reactor configured to perform an etch process therein, said etch process being driven by a power source connected to said etching reactor;

an end-point detector for detecting an endpoint of said etching process, said end-point detector comprising a detecting section and a calculating section, said detecting section being configured to sequentially detect data relating to the etch process within said etching reactor, said calculating section being configured to determine a correlation matrix using first measured data regarding a first etch process over successive time intervals to form a first recorded data matrix, assemble a first endpoint signal matrix using target endpoint data for a specific etch process, perform a partial least squares analysis on the first recorded data matrix and the first endpoint signal matrix to refine the first recorded data matrix, compute a correlation matrix based upon the refined recorded data matrix and the first endpoint signal matrix, and form a second recorded data matrix for a second etch process, wherein said

calculating section is configured to analyze the correlation matrix and the second recorded data matrix and produce an endpoint signal when an endpoint of the second etch process has been achieved; and

a controller configured to receive said endpoint signal from said calculating section, said controller being configured to control said power source based upon said endpoint signal.

18. The apparatus according to Claim 17, wherein said detecting section comprises a photodetector configured to sequentially detect an emission spectrum within said etching reactor.

19. The apparatus according to Claim 18, wherein said photodetector section comprises a high resolution optical emission spectroscopy sensor.

20. The apparatus according to Claim 18, wherein said etching reactor includes a vacuum chamber having a view window made of transparent material through which said detecting section detects the emission spectrum.

21. The apparatus according to Claim 17, wherein said etching reactor is a capacitively coupled plasma reactor including a vacuum chamber, a pair of parallel plate electrodes provided within said vacuum chamber, a gas injection line connected to said vacuum chamber, and a gas exhaust line connected to said vacuum chamber, wherein said power source is a high frequency power source connected to one of said pair of parallel plate electrodes.

22. The apparatus according to Claim 17, wherein said etching reactor is selected from a group consisting essentially of a multi-frequency capacitively coupled plasma reactor, an inductively coupled plasma reactor, an electron cyclotron resonance reactor, and a helicon plasma reactor.

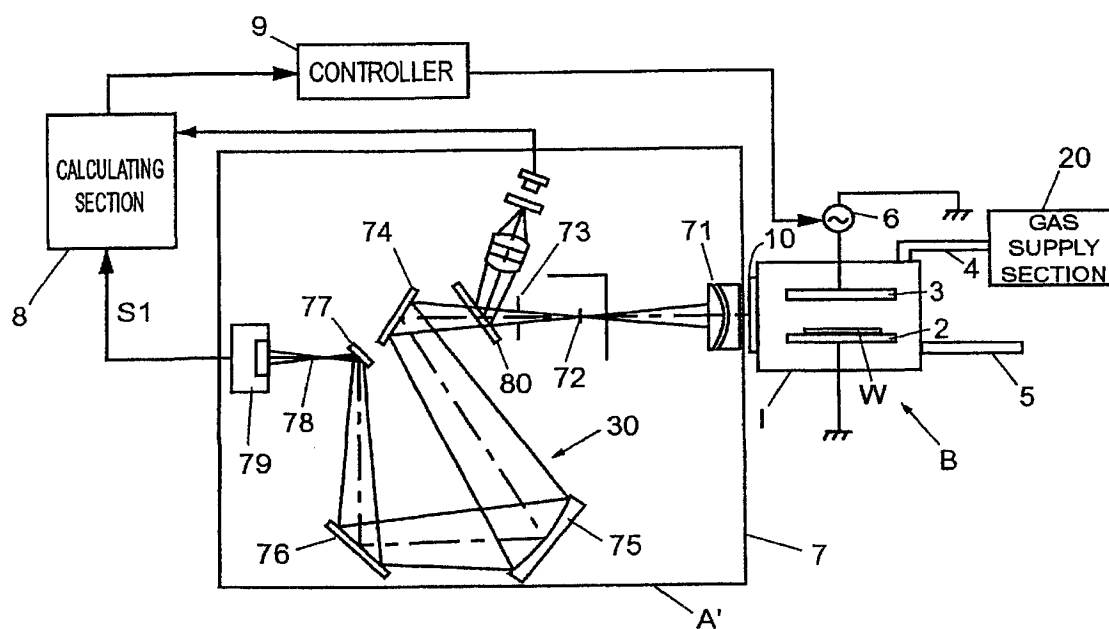
23. The apparatus according to Claim 17, wherein said calculating section is configured to calculate variable importance in projection data defined as an influence on the first endpoint signal matrix of the first measured data, and refine the first recorded data matrix based upon an analysis of the variable importance in projection data.

24. The apparatus according to Claim 23, wherein said calculating section is configured to refine the first recorded data matrix by analyzing the variable importance in projection data to determine if a variable within the first recorded data matrix can be eliminated as having minimal impact on the first endpoint signal matrix.

25. The apparatus according to Claim 17, wherein said detecting section is configured to sequentially detect electrical signal data relating to the etch process within said etching reactor.

26. The apparatus according to Claim 17, wherein said detecting section is configured to sequentially detect match network capacitor setting data relating to the etch process within said etching reactor.

**1/5**



**FIG. 1 (BACKGROUND ART)**

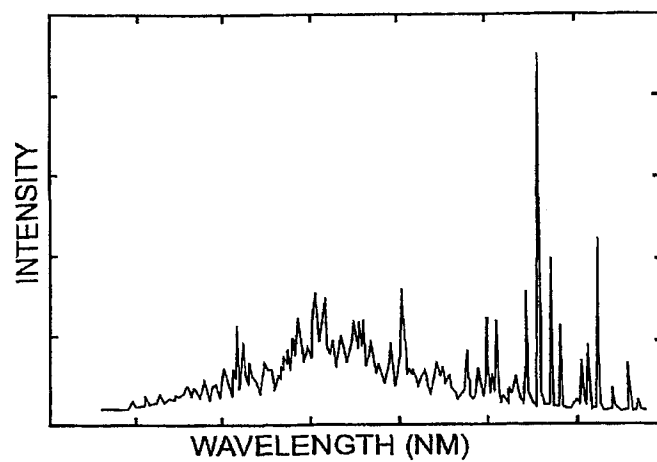


FIG. 2

2/5

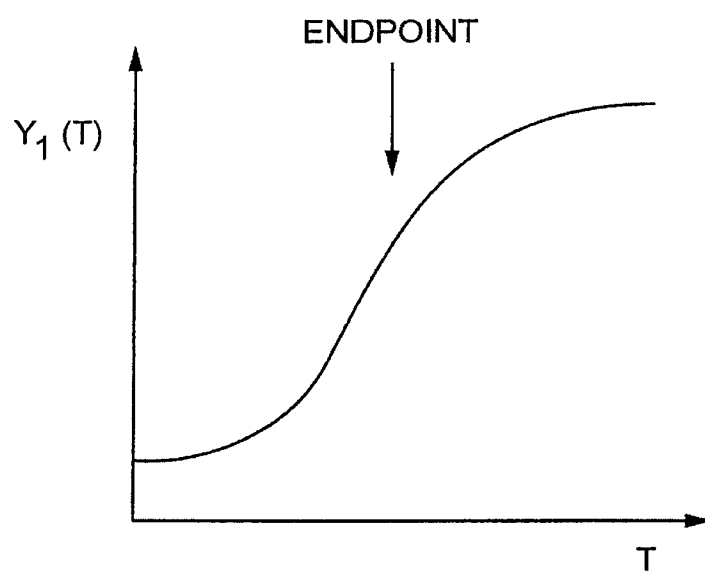


FIG. 3A

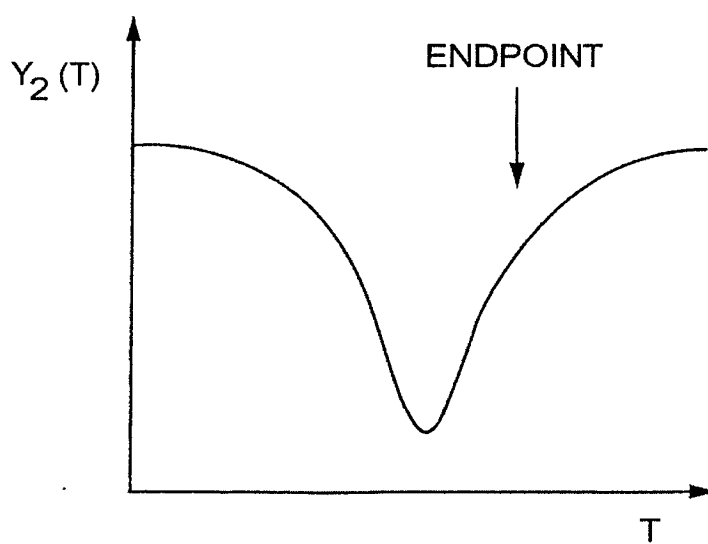


FIG. 3B

3/5

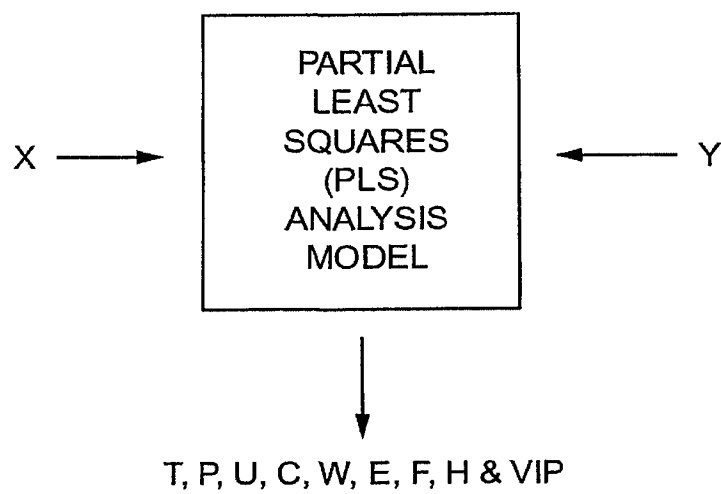


FIG. 4

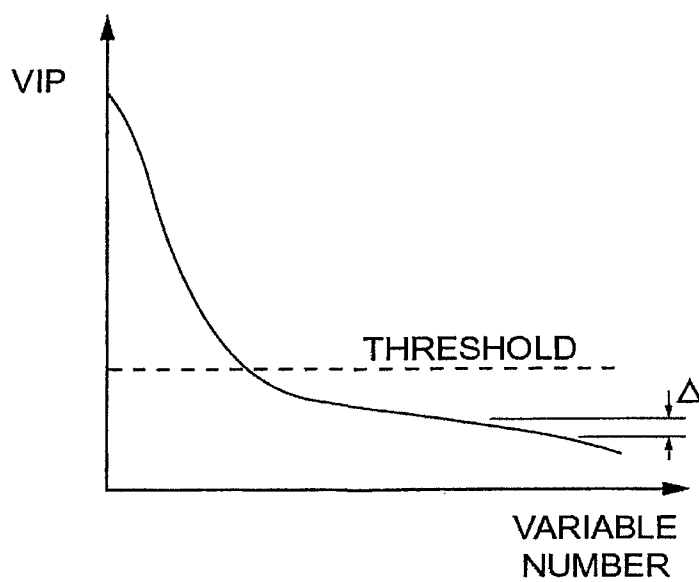


FIG. 5

4/5

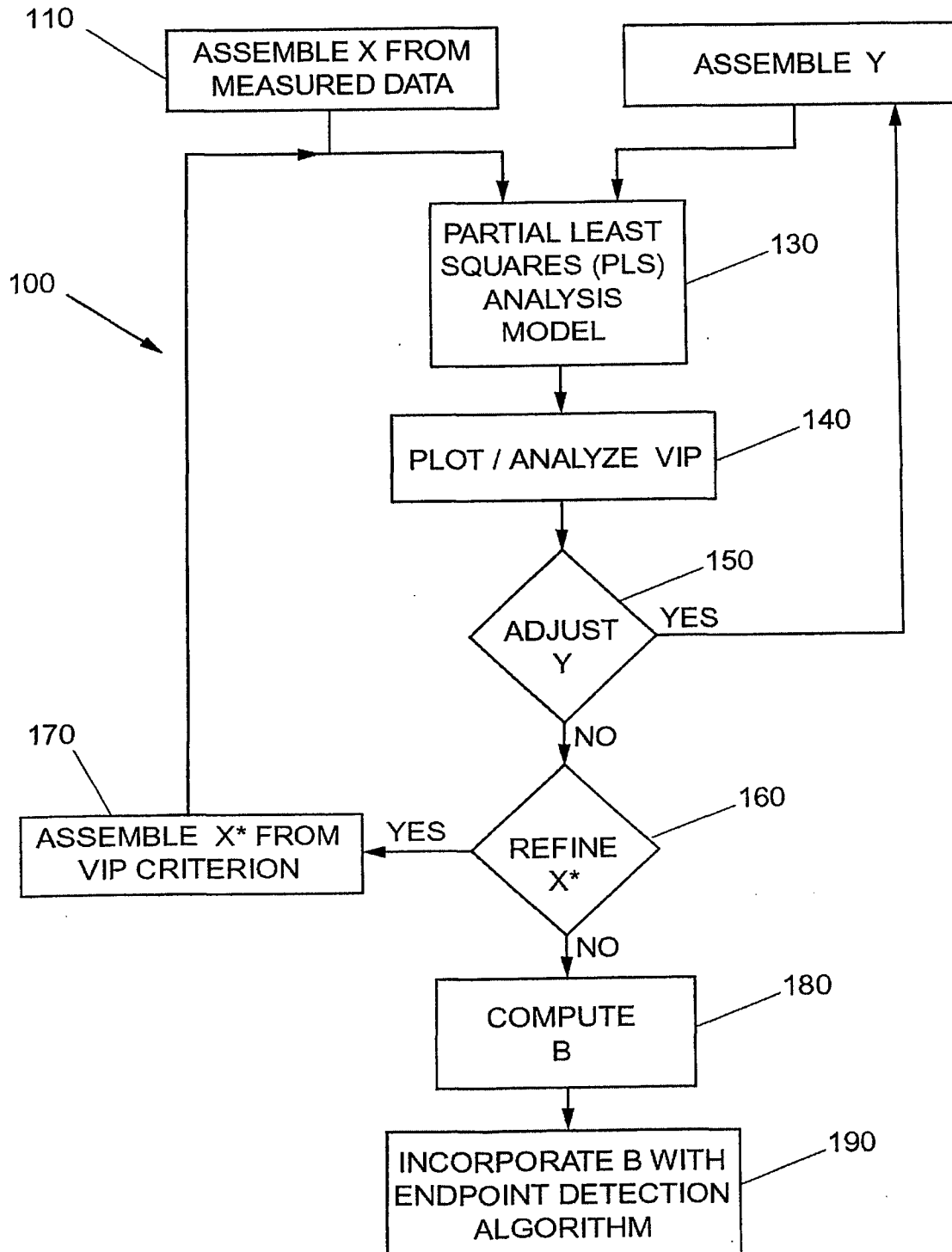


FIG. 6



5/5

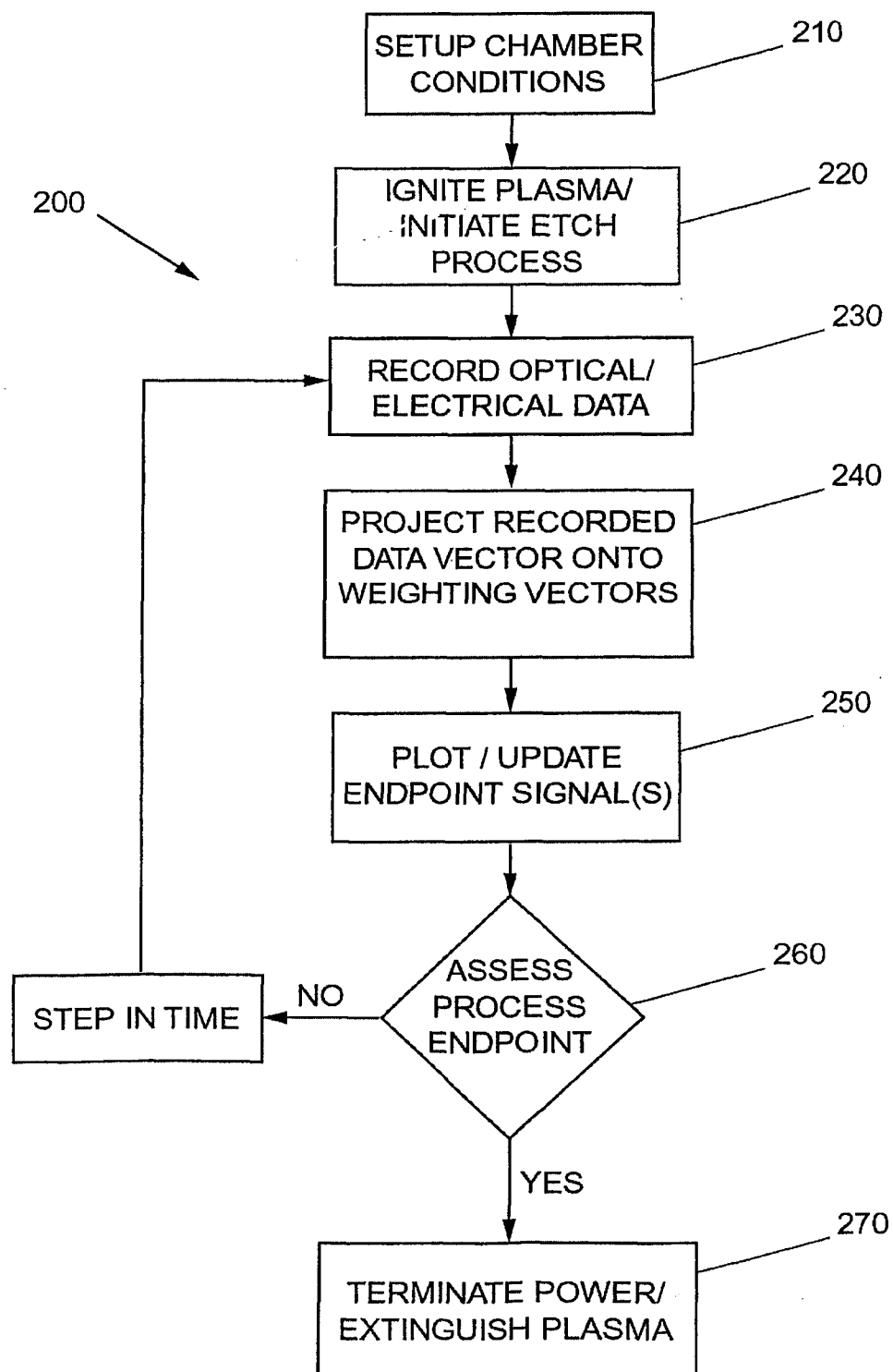


FIG. 7

(12) INTERNATIONAL APPLICATION PUBLISHED UNDER THE PATENT COOPERATION TREATY (PCT)

(19) World Intellectual Property Organization  
International Bureau



(43) International Publication Date  
3 October 2002 (03.10.2002)

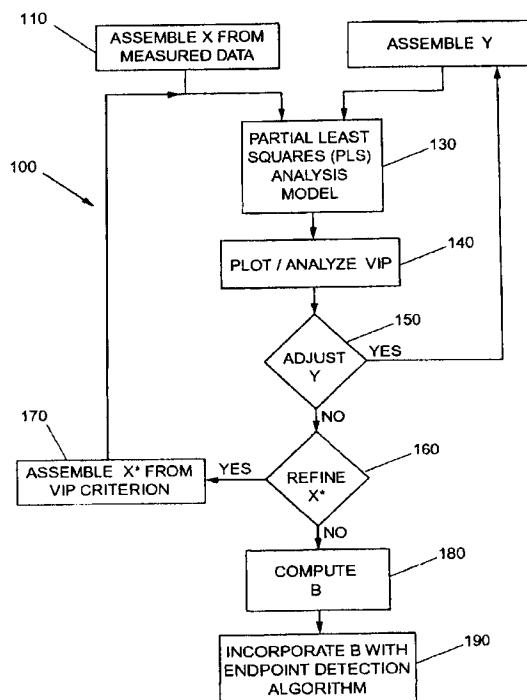
PCT

(10) International Publication Number  
**WO 02/077589 A3**

- (51) International Patent Classification<sup>7</sup>: **G01J 3/457**
- (21) International Application Number: **PCT/US02/09073**
- (22) International Filing Date: **25 March 2002 (25.03.2002)**
- (25) Filing Language: **English**
- (26) Publication Language: **English**
- (30) Priority Data:  
**60/277,981** **23 March 2001 (23.03.2001)** **US**
- (71) Applicant (for all designated States except US): **TOKYO ELECTRON LIMITED [JP/JP]**; TBS Broadcast Center, 3-6, Akasaka 5-chome, Minato-ku, Tokyo 107-8481 (JP).
- (71) Applicant and  
(72) Inventor: **FATKE, David** [—/US]; 8000 David Mountain Cove, Austin, TX 78726 (US).
- (72) Inventor; and  
(75) Inventor/Applicant (for US only): **YUE, Hongyu** [—/US]; 5705 Janabyrd Lane, Austin, TX 78749 (US).
- (74) Agent: **CASEY, Michael, R.**; Oblon, Spivak, McClelland, Maier & Neustadt, P.C., Fourth Floor, 1755 Jefferson Davis Highway, Arlington, VA 22202 (US).
- (81) Designated States (national): **AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NO, NZ, OM, PH, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VN, YU, ZA, ZM, ZW.**
- (84) Designated States (regional): **ARIPO** patent (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), **Eurasian** patent (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), **European** patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR,

[Continued on next page]

(54) Title: **METHOD AND APPARATUS FOR ENDPOINT DETECTION USING PARTIAL LEAST SQUARES**



(57) Abstract: An apparatus and method for detection of a feature etch completion within an etching reactor. The method includes determining a correlation matrix by recording first measured data regarding a first etch process over successive time intervals to form a first recorded data matrix (110), assembling a first endpoint signal matrix using target endpoint data for a specific etch process, performing a partial least squares analysis (130) on the recorded data matrix and the first endpoint signal matrix to refine the recorded data matrix, and computing a correlation matrix (180) based upon the refined recorded data matrix and the first endpoint signal matrix. The method further includes performing a second etch process to form a second recorded data matrix. The correlation matrix and the second recorded data matrix are analyzed to determine whether an endpoint of the second etch process has been achieved.

WO 02/077589 A3



GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR), OAPI patent  
(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR,  
NE, SN, TD, TG).

**(88) Date of publication of the international search report:**  
14 November 2002

**Published:**

--- with international search report

*For two-letter codes and other abbreviations, refer to the "Guidance Notes on Codes and Abbreviations" appearing at the beginning of each regular issue of the PCT Gazette.*

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/US02/09073

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

IPC(7) : G01J 3/457

US CL : 216/59, 60, 61; 156/345.25

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

U.S. : 216/59, 60, 61; 156/345.25

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)  
EAST (US patents, EPO, JPO, Derwent, IBM Tech Discl Bull)

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	US 6,046,796 A (MARKLE et al) 04 April 2000 (04.04.2000), col.3, line 11 - col.4, line 11, col.5, line 61.	1-26
Y	JP 63-200,533 A (ANELVA CORP) 18 August 1988 (18.08.1988), see abstract.	1-26
Y	JP 63-093,115 A (HITACHI LTD) 23 April 1988 (23.04.1988), see abstract.	1-26
Y	JP 03-181,129 A (SUMITOMO METAL IND LTD) 7 August 1991 (07.08.1991), see abstract.	1-26
Y	US 6,153,115 A (LE et al) 28 November 2000 (28.11.2000), col.2, line 33-col.3, line13.	1-26
Y	Tan. L. et al. Steady-state regression analysis and optimization of multivariable plasma etching system. IECON Proceedings, September 1994, Vol.3, pages 1986-1991, especially sections 2 and 3, page 1987.	1-26
Y	Wangmaneerat, B. et al. Plasma etching diagnostics for silicon nitride thin films using emission spectroscopy and multivariate calibration. Proc. - Electrochem. Soc., 1992, Vol.92-18, pages 115-126, especially 117-120.	1-26



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

\* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T"

later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X"

document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y"

document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&"

document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

29 July 2002 (29.07.2002)

Date of mailing of the international search report

22 AUG 2002

Name and mailing address of the ISA/US

Commissioner of Patents and Trademarks

Box PCT

Washington, D.C. 20231

Facsimile No. (703)305-3230

Authorized officer

Anita K Alanko

Jean Proctor

Paralegal Specialist

Telephone No. 703-308-0661

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

PCT/US02/09073

## C. (Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	Lee, S. F. et al. Prediction of Wafer State After Plasma Processing Using Real-Time Tool Data. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, August 1995, Vol.8, No. 3, pages 252-261, especially 254-256.	1-26
Y	Dose, V. Multivariate Analysis of PECVD Data. Appl. Phys. A 1993, Vol.A56, pages 471-477, especially pages 472-476.	1-26